

IMPACTO DEL GRADO DE OXIDACIÓN DEL REFUERZO EN EL DESEMPEÑO  
SÍSMICO DE UNA ESTRUCTURA EN CONCRETO



DANIEL FELIPE PARRA CASTAÑEDA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
BOGOTÁ  
2021

IMPACTO DEL GRADO DE OXIDACIÓN DEL REFUERZO EN EL DESEMPEÑO  
SÍSMICO DE UNA ESTRUCTURA EN CONCRETO



DANIEL FELIPE PARRA CASTAÑEDA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:  
OSCAR CONTRERAS BEJARANO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
BOGOTÁ  
2021



## Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

### Usted es libre de:

**Compartir** — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



**SinDerivadas** — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

**No hay restricciones adicionales** — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá, 25 de junio 2021

## RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo comparar el desempeño sísmico de una estructura en condición no oxidada con otra misma estructura bajo la exposición de oxidación en el refuerzo. El proceso de degradación de concreto armado a causa de la corrosión del refuerzo, disminuye la vida útil de las estructuras con este material, como consecuencia se produce la fisuración y agrietamiento del concreto. Este trabajo se presenta como una oportunidad para identificar la influencia de la corrosión en el comportamiento de las estructuras en concreto reforzado. Mediante herramientas como el Software Opensees se estima la curva de capacidad de las edificaciones, este es un software especializado en análisis de estructuras en donde el modelo de plastificación de los elementos usado es por fibras con una distribución de carga lateral triangular. Dentro de las conclusiones de esta investigación se puede evidenciar que la influencia de la corrosión en el desempeño de la edificación estudiada no es significativa, con lo cual se podría pensar en realizar estudios en donde el índice de corrosión sea mayor que el usado en este trabajo.

En una gran mayoría de casos se utilizan programas para diseño y cálculo de estructuras conocidos por muchos como lo son el SAP 2000, cypecad, midas, autodesk robot, tekla structures, en este caso decidí involucrar el opeensees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) que es un programa de código abierto, está bajo constante desarrollo, los diseñadores y los usuarios pueden actualizar sus bases permanentemente. Y viene con un lenguaje de interpretación TCL “Tool Command Language.” lenguaje de herramientas de comando, ha sido utilizado para soporte de los comandos de OpenSees, los cuales son usados para la definición de la geometría del problema, estados de carga, formulación y solución. Y todo esto se involucró con el decreto 523 del 2010 el cual abarca la microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá D.C., donde encontramos cada uno de sus tipos de suelos por zonas.

## DEDICATORIA

Este trabajo lo quiero dedicar especialmente a DIOS por hacerme sentir paz en todos aquellos momentos en los que sentia preocupacion y desconcentracion en mi estudio, por darme fortaleza y sabiduria durante toda mi formacion profesional, a toda mi familia por brindarme ese apoyo incondicional y unico que me hacia sentir mas seguro a cada instante, y a cada una de las personas que hicieron parte de este proceso tan gratificante e increible para mi vida lleno de inexplicables, grandiosos, buenos, regulares, malos, tistes, felices momentos que quedaran marcados para siempre en mi mente y corazon.

Tambien quiero dedicar esta tesis para formar un mejor mundo brindando mis conocimientos como aporte positivo a nuevas generaciones.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco inmensamente a DIOS por hacer de mi no solo un ingeniero civil sino tambien un hombre de bien, por darme luz espiritual y ser mi guia.

Agradezco especialmente a indira moreno por brindarme su compañía,apoyo,paciencia, y consejos en el transcurso de mi formacion.

Agradezco infinitamente a toda mi familia y principalmente a mis padres por toda su colaboracion afectiva, economica,moral, y por el impulso diario para que diera lo mejor de mi.

Agradezco de forma gratificante a mi director de trabajo de grado al ingeniero oscar contreras bejarano por el acompañamiento academico y su gran voluntad y empeño en enseñarme a nivel general nuevos conceptos para mi vida y meta profesional.

Agradezco tambien a todas y cada una de las personas que se cruzaron en este proceso para darme motivacion y buena energia en el transcurso de estos años.

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>14</b>
<b>2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN</b>	<b>16</b>
2.1. ANTECEDENTES . . . . .	16
2.2. JUSTIFICACIÓN . . . . .	21
<b>3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>22</b>
3.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN . . . . .	22
<b>4. MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>24</b>
4.1. MARCO TEÓRICO . . . . .	24
4.1.1. Concreto confinado (Modelo Mander) . . . . .	25
4.1.2. Carbonatación del concreto . . . . .	28
4.1.3. Análisis estático no lineal (Pushover) . . . . .	29
4.1.4. Espectro de diseño . . . . .	33
4.2. MARCO CONCEPTUAL . . . . .	35
<b>5. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>37</b>
<b>6. OBJETIVOS</b>	<b>41</b>
6.1. OBJETIVO GENERAL . . . . .	41
6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS . . . . .	41
<b>7. ALCANCES Y LIMITACIONES</b>	<b>42</b>
7.1. ALCANCES . . . . .	42
7.2. LIMITACIONES . . . . .	42
<b>8. METODOLOGÍA</b>	<b>43</b>
8.1. FASE 1 . . . . .	43
8.2. FASE 2 . . . . .	45
8.3. FASE 3 . . . . .	46
<b>9. DESCRIPCIÓN DEL MODELO</b>	<b>49</b>
9.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS . . . . .	49
9.1.1. Secciones Vigas . . . . .	49
9.1.2. Secciones Columnas . . . . .	50



9.2. DISTRIBUCIÓN DEL REFUERZO . . . . .	55
9.3. ZONA DE AMENAZA SÍSMICA . . . . .	55
<b>10.MATERIALES CONSTITUTIVOS</b>	<b>57</b>
10.1. CONCRETO NO CONFINADO . . . . .	57
10.2. CONCRETO CONFINADO . . . . .	59
10.2.1. Seccion A-I-10 . . . . .	59
10.2.2. Seccion A-I-20 . . . . .	60
10.2.3. Seccion A-II-10 . . . . .	60
10.2.4. Seccion A-II-20 . . . . .	61
10.2.5. Seccion A-III-10 . . . . .	63
10.2.6. Seccion A-III-20 . . . . .	63
10.2.7. Seccion C-I-5 . . . . .	64
10.2.8. Seccion C-II-10 . . . . .	65
10.2.9. Seccion C-III-10 . . . . .	66
10.2.10. Seccion C-IV-10 . . . . .	67
10.2.11. Seccion C-V-10 . . . . .	68
10.3. ACERO . . . . .	68
<b>11.ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA</b>	<b>70</b>
11.1. CAPACIDAD . . . . .	70
11.2. DEMANDA . . . . .	71
<b>12.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>73</b>

# Índice de figuras

3.1. Árbol de problemas . . . . .	23
4.1. Sección transversal de un elemento estructural . . . . .	26
4.2. Razón de confinamiento . . . . .	27
4.3. Carbonatación del concreto . . . . .	29
4.4. Análisis Pushover . . . . .	30
4.5. Transformación de la curva de capacidad . . . . .	31
4.6. Transformación de la curva de demanda . . . . .	31
4.7. Representación bilineal de la curva de capacidad . . . . .	32
4.8. Parametros a considerar . . . . .	33
4.9. Espectro de diseño . . . . .	35
5.1. Clusters encontrados en VOSviewer . . . . .	37
8.1. Flujograma de la Metodología . . . . .	43
8.2. Planta del modelo a analizar . . . . .	44
8.3. Alzado del modelo a analizar . . . . .	45
8.4. Viga típica de la estructura modelo . . . . .	45
8.5. Espectro utilizado en el diseño del modelo . . . . .	46
8.6. Flujograma Procedimiento Opensees . . . . .	48
9.1. Secciones de Vigas . . . . .	49
9.2. Secciones de Columnas . . . . .	50
9.3. Coordenadas Edificio . . . . .	51
9.4. Elementos Edificio . . . . .	54
9.5. Dimensiones de secciones y refuerzos para columnas . . . . .	55
10.1. Concreto no confinado . . . . .	57
10.2. Relación tensión-deformación del material-concrete01 . . . . .	58
10.3. Seccion A-I-10 . . . . .	59
10.4. Seccion A-I-20 . . . . .	60
10.5. Seccion A-II-10 . . . . .	61
10.6. Seccion A-II-20 . . . . .	61
10.7. Seccion A-III-10 . . . . .	63
10.8. Seccion A-III-20 . . . . .	63
10.9. Seccion C-I-5 . . . . .	64
10.10 Seccion C-II-10 . . . . .	65
10.11 Seccion C-II-10 . . . . .	65

10.12Seccion C-III-10 . . . . .	66
10.13Seccion C-IV-10 . . . . .	67
10.14Seccion C-V-10 . . . . .	68
10.15Relacion tension-deformacion histeretica tipica del material- Hysteretic	69
11.1. Resultados Opensees . . . . .	70
11.2. Curva de demanda - Piedemonte B . . . . .	71

# Índice de cuadros

4.1. Tipo de comportamiento estructural . . . . .	33
4.2. Coeficientes de diseño . . . . .	34
9.1. Refuerzos en Secciones . . . . .	55

Considerando el acuerdo 213 del año 2015 de la Universidad Católica de Colombia y las líneas de investigación aprobadas por la Universidad se establece que:

**Alternativa:** trabajo de investigación.

**Línea de investigación:** gestión y tecnología para la sustentabilidad de las comunidades.

**Eje temático:** desempeño de estructuras bajo la acción de la oxidación en el acero.

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

El proceso de degradación del concreto armado a causa de la corrosión del refuerzo, disminuye la vida útil de las estructuras con este material. Como consecuencia se produce la fisuración y agrietamiento del mismo. La cantidad de contaminación presente en un territorio urbanizado es uno de los principales agentes que afecta a las estructuras de concreto. Debido a la porosidad de este material, la concentración de agentes contaminantes tienden a filtrarse dentro de la matriz de concreto hasta llegar al refuerzo de acero, el efecto de la contaminación sobre este material hace que se produzca un nuevo material al rededor del perímetro de los refuerzos, lo que trae como consecuencia el debilitamiento del acero y también nuevos esfuerzos a la matriz del concreto alrededor del refuerzo.

Por lo tanto, la corrosión en el concreto reforzado es un problema que afecta la integridad estructural de las edificaciones y en general cualquier estructura en concreto. El dióxido de carbono puede avanzar rápidamente en el concreto en función de la exposición a cambios en la climatología y agentes ambientales.

Una de las investigaciones más importantes actualmente realizadas se centra en la durabilidad de los puentes de concreto armado, en este artículo se presentan procedimientos eficaces evaluados bajo parámetros de un mecanismo de colapso sometidos a cargas sujetos a los efectos de la corrosión en la estructura [1]. La corrosión siempre ha sido un punto con incógnitas por resolver, por lo tanto, es importante investigar acerca de los fenómenos contaminantes que ponen en un estado de vulnerabilidad desde las estructuras más importantes hasta la edificación pequeña sin importar el punto geográfico en el que se encuentre ubicado [2].

En este documento se aplica la descripción de un modelo que contiene las características geométricas de la estructura clasificadas en las secciones de las vigas y las secciones de las columnas, también encontraremos como la distribución del refuerzo juega un gran papel que brinda mayor fortalecimiento de la estructura a nivel general. Se estudia una estructura determinada en el artículo con una corrosión moderada, expuesta a condiciones ambientales agresivas; mediante cálculos matemáticos se logró detallar un análisis que demuestra a través de un espectro como en una de las zonas evaluadas se evidencia similitud al espectro inicial del artículo base de esta parte de la investigación. Por otro lado en este documento encontraran

mediante ilustraciones graficas como reaccionan los materiales constitutivos que en este caso son el concreto no confinado, el concreto confinado y el acero con sus respectivos detalles y reacciones ante el comportamiento de cada material; la demanda de la estructura fue hallada para entender a fondo la composicion especifica de los materiales en uso, ademas con los resultados de la curva de capacidad obtenida en opensees notara como se logra identificar los cambios por carbonatacion.

Esto aun no habia sido investigado mediante un programa de código abierto como el que se utilizo Opensees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) y basados en la microzonificación sísmica de Bogota D.C.

# Capítulo 2

## ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

### 2.1. ANTECEDENTES

#### **Año 2003**

*Un estudio experimental sobre los efectos del reacondicionamiento de columnas de hormigón armado dañadas por corrosión de barras reforzadas con láminas de fibra de carbono [3]*

*Autor:* Lee, Han Seung-Kage, Tadatsugu-Noguchi, Takafumi-Tomosawa, Fuminori

*Revista:* Cement and Concrete Research

A través del reacondicionamiento que se trata con el concreto armado en este trabajo se busca aplicar técnicas experimentales con el fin de recuperar las partes dañadas por corrosión analizando las propiedades mecánicas del refuerzo de los elementos analizados.

#### **Año 2006**

*Efecto de la corrosión sobre la adherencia en hormigón armado bajo carga cíclica[4]*

*Autor:* Fang, Congqi-Gylltoft, Kent-Lundgren, Karin-Plos, Mario *Revista:* Cement and Concrete Research

De Manera experimental en este año se realizó un trabajo que determinó el efecto que la corrosión causa en la adherencia del concreto con el acero de refuerzo bajo un protocolo de carga. Esto fue realizado a través de ensayos de tensión de adherencia con muestras de refuerzos corroídas en concreto bajo condiciones cíclicas. Se tuvieron en cuenta parámetros relacionados con el número de ciclos (10) y degradación de enlaces (0,0-1,0), arrojando como resultado una magnitud de 7,6 % de corrosión máxima.

#### **Año 2008**

*Consecuencias de la corrosión del acero en las propiedades de ductilidad de la barra de refuerzo[5]*

*Autor:* Apostolopoulos, C. A.-Papadakis, V. G.

*Revista:* Construction and Building Materials

En esta investigación se realiza un estudio experimental con barras de refuerzo de acero registrando el nivel de ductilidad bajo un protocolo de carga a tracción con el fin de poder comparar esta propiedad con la muestra de control y evidenciar el cambio cuando el acero tenga procesos de corrosión, con el propósito de predecir la vida



útil de la estructura cuando esté en condiciones costeras o de alta contaminación. Según los resultados se puede afirmar que, al aumentar la duración de la exposición a un entorno corrosivo, la pérdida de masa del acero crece de manera considerable en los primeros 10, 20 y 30 días respectivamente involucrados. Para una duración de 60 días se evidencia que la muestra pierde un 11 % de masa.

### **Año 2008**

*Modelos probabilísticos de capacidad y estimaciones de fragilidad sísmica para columnas RC sujetas a corrosión[6]*

*Autor:* Choe, Do Eun-Gardoni, Paolo-Rosowsky, David-Haukaas, Terje *Revista:* Reliability Engineering and System Safety

El primer artículo de este año habla acerca del análisis probabilista que se realizó a columnas de concreto reforzado para conocer la vulnerabilidad que estas presentan ante la acción sísmica una vez el refuerzo entra en condiciones de corrosión. Para este estudio se realizó la construcción de un modelo probabilista desarrollado previamente para la capacidad de fuerza de deriva y cortante de columnas de concreto reforzado prístinas en los cuales se representa una fusión entre un modelo probabilístico para la corrosión inducida por cloruros, y una tasa de corrosión dependiente del tiempo.

### **Año 2008**

*Estudio de la corrosión del refuerzo en elementos de concreto utilizados para la reparación de monumentos[7]*

*Autor:* Apostolopoulos, C. A.-Koutsoukos, P. G.

*Revista:* Construction and Building Materials

El segundo artículo publicado este año realiza un estudio interesante de la corrosión de monumentos en concreto. Considerando que las barras de acero s500s tempcore poseen propiedades de degradación acelerada ante la exposición de agentes ambientales, sus propiedades de tracción se ven afectadas. Según los resultados principales de este trabajo, las pérdidas de masa por corrosión fueron significativas alcanzando valores del 32 % durante 90 días de exposición en condiciones de niebla salina.

### **Año 2009**

*Comportamiento sísmico de columnas de concreto armado dañadas por corrosión reforzadas con una combinación de polímero reforzado con fibra de carbono y camisa de acero[8]*

*Autor:* Li, Jinbo-Gong, Jinxin-Wang, Licheng

*Revista:* Construction and Building Materials

En esta investigación se realiza un estudio a columnas de concreto armado utilizando polímeros reforzados a través de un modelo experimental que consiste en la aplicación simultánea de láminas de polímero reforzado con fibra de carbono (CFRP) y camisa de acero para mejorar el refuerzo.

Fue desarrollado para registrar el seguimiento del comportamiento sísmico bajo un protocolo de carga en un muro de reacción para estimar el aumento en la resistencia de la columna cuando esta reforzada con dichos polímeros y una camisa de acero. Se probaron un total de 14 columnas de concreto reforzado bajo combinación cíclica

lateral excursiones de desplazamiento y carga axial constante; dando como resultado un aumento significativo de la resistencia y ductilidad de la columna reforzada.

#### **Año 2011**

*Corrosión de barras de refuerzo expuestas, degradación mecánica asociada y correlación con pruebas de corrosión acelerada[9]*

*Autor:* Papadopoulos, M. P.-Apostolopoulos, C. A.-Zervaki, A.

*D.-Haidemenopoulos, G.N. Revista:* Construction and Building Materials

La exposición a la corrosión que tienen las barras de refuerzo en una estructura en concreto causa una degradación en las propiedades mecánicas del sistema. Para esta investigación se utilizó una cámara de oxidación acelerada para iniciar el proceso de corrosión en el acero y volver a evaluar sus características mecánicas. Se evidencia que las varillas expuestas sufren de corrosión uniforme seguida de degradación mecánica. Esto es comprobado a través de 2 factores. En el primer caso, el factor de aceleración es de aproximadamente 74.5, mientras que en el segundo caso es de aproximadamente 79, por lo tanto, la vida útil de un edificio que este situado en zonas costeras puede provocar una degradación grave.

#### **Año 2011**

*Efecto de la corrosión del acero y pérdida del recubrimiento del concreto sobre la resistencia de las columnas RC deterioradas[10]*

*Autor:* Tapan, M.-Aboutaha, R. S.

*Revista:* Construction and Building Materials

En una sección de concreto compuesto por acero, concreto confinado (núcleo) y concreto no confinado (recubrimiento) el primer material que pierde su capacidad será el recubrimiento. La durabilidad del concreto respecto a las columnas depende de que el acero desarrolle resistencia a la corrosión. En este trabajo se realizó un análisis con diferentes componentes de calidades con el fin de ayudar a entender su comportamiento frente al deterioro estructural de las columnas. Estas columnas se cuantifican mediante el desarrollo de diagramas de interacción momento-carga axial (M-P) utilizando un procedimiento de análisis modificado y modelos avanzados de deterioración de materiales. Los resultados de este estudio sugieren que para columnas deterioradas la cantidad de pérdida de resistencia depende de la ubicación y la cantidad del deterioro.

#### **Año 2012**

*Comportamiento de columnas circulares de concreto reforzado dañadas por corrosión bajo cargas cíclicas[11]*

*Autor:* Ma, Ying-Che, Yi-Gong, Jinxin

*Revista:* Construction and Building Materials

En este trabajo se realizó un modelo experimental de columnas circulares en concreto. A través de una mesa vibratoria y un actuador se le imprime un protocolo de carga cíclica a la columna circular. Las columnas fueron probadas bajo excursiones de desplazamiento lateral cíclico combinado y carga axial constante, se encuentra que las relaciones de pérdida por corrosión del acero variaron de 0 % a 15,1 % y las relaciones de carga axial variaron de 0,15 a 0,9. Las columnas gravemente corroídas

tuvieron una pérdida por corrosión de entre el 10-20 %, afectando su comportamiento sísmico.

#### **Año 2012**

*Evaluación del riesgo estructural de estructuras de RC corroídas bajo excitación sísmica*[12]

*Autor:* Berto, Luisa-Saetta, Anna-Simioni, Paola

*Revista:* Construction and Building Materials

Las evaluaciones de riesgo sísmico que se realizan a las estructuras de concreto reforzado son realizadas con el fin de proyectar la capacidad de los elementos de la estructura ante excitaciones sísmicas. En esta investigación se desarrolla una metodología con 4 fases para determinar la variación de la respuesta sísmica y el comportamiento de una estructura como caso real durante su vida útil, en presencia de niveles de degradación crecientes.

#### **Año 2012**

*Evaluación del desempeño sísmico dependiente del tiempo de un pórtico de un solo grado de libertad sujeto a corrosión*[13]

*Autor:* Yalciner, Hakan-Sensoy, Serhan-Eren, Ozgur

*Revista:* Engineering Failure Analysis

Un pórtico simple sujeto una sola dirección de aplicación de una señal sísmica es analizada en este trabajo. Dicho pórtico es expuesto a procesos de oxidación, con el fin de evaluar su desempeño sísmico después de sufrir corrosión. Los efectos de la corrosión fueron calculados en función de la velocidad de corrosión durante cinco períodos de tiempo diferentes (25, 50, 75 y 100 años). Al utilizar un análisis de historial de tiempo para 20 registros de movimiento de suelo se encuentra que el efecto de la corrosión de acero en el nivel de rendimiento sísmico es significativo, y debe considerarse cuidadosamente en el análisis de capacidad. Por otra parte, también se identificó que existen fuertes relaciones entre el deslizamiento del refuerzo en el concreto y la relación de desplazamiento del techo del pórtico.

#### **Año 2013**

*Respuesta cíclica no lineal de barras de refuerzo dañadas por corrosión con efecto de pandeo*[14]

*Autor:* Kashani, Mohammad M.-Crewe, Adam J.-Alexander, Nicholas A. *Revista:* Construction and Building Materials

Los resultados cíclicos no lineales provocados por la corrosión bajo el efecto de pandeo causan inestabilidad en la estructura. Los resultados experimentales de este estudio mostraron que las barras corroídas con picaduras se fracturan en tensión después de menos ciclos de inversión del esfuerzo.

#### **Año 2013**

*Comportamiento de esfuerzo-deformación no lineal de las barras de refuerzo dañadas por corrosión, incluido el pandeo inelástico*[15]

*Autor:* Kashani, Mohammad M.-Crewe, Adam J.-Alexander, Nicholas A. *Revista:* Engineering Structures

En este artículo, el comportamiento tensión-deformación no lineal de las barras de refuerzo corroídas se han estudiado mediante pruebas experimentales exhaustivas. Los resultados muestran que un nivel de corrosión superior al 15 % de pérdida de masa afecta significativamente la ductilidad y deformación plástica del refuerzo en tensión. Así mismo, se incrementa la probabilidad de sufrir fenómenos de pandeo al activarse los procesos de corrosión.

#### **Año 2014**

*Evaluación de la muestra de concreto reforzado dañado por la corrosión de las barras de refuerzo mediante la técnica de emisión acústica[16]*

*Autor:* Kawasaki, Yuma-Wasada, Shota-Okamoto, Takahisa-Izuno, Kazuyuki *Revista:* Construction and Building Materials

La técnica de emisión acústica detalla la corrosión en las barras de refuerzo para medir el nivel de degradación que sufren las estructuras mediante los efectos sísmicos u otros factores. Dicha técnica es utilizada en esta investigación con muestras de concreto reforzado. Se encuentra que las propiedades mecánicas en la etapa de aceleración disminuyen desde la etapa latente, y las actividades de AE están correlacionadas con la capacidad sísmica de los especímenes.

#### **Año 2014**

*El efecto de los estribos corroídos sobre el comportamiento a cortante de las vigas de hormigón armado[17]*

*Autor:* Shehab, R. H.-Mahmoud, A. S.-Mansoor, Y. A.

*Revista:* OP Conference Series: Materials Science and Engineering

El comportamiento a cortante del concreto reforzado es un tema de análisis en la actualidad.

En esta investigación se utilizan estribos o refuerzo de confinamiento sometidos a condiciones agresivas con el fin de provocar corrosión, después de analizar el efecto de la oxidación en 20 vigas de concreto de hormigón armado con dimensiones de 150 mm 220 mm 1400 mm que fueron fabricadas para el estudio. Se encontró una alta correlación entre pérdida de masa calculada y pérdida de masa real en los refuerzos debido a la aceleración de corrosión; Los datos recopilados de las vigas con 10 %, 15 % y 20 % de pérdida de masa mostraron una rápida reducción en la capacidad de carga, rigidez de la viga y disipación de energía sísmica.

#### **Año 2015**

*Falla por corrosión en el refuerzo de concreto a daños durante fuerzas sísmicas[18]*

*Autor:* Dogan, Mizam

*Revista:* Engineering Failure Analysis

En este estudio, se examinan las causas de la corrosión de las barras de refuerzo y las fases de corrosión. Las estructuras de hormigón armado y acero se diseñan teniendo en cuenta las cargas sísmicas; la mayoría de los metales no son resistentes al agua ni a los efectos atmosféricos y experimentan corrosión incluso en condiciones normales. El oxígeno, la humedad y el electrolito son requeridos para la corrosión. Incluso si uno de ellos no existe, no se producirá corrosión.

## 2.2. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación se realiza para estimar la reacción entre el desempeño sísmico de una estructura de concreto y la exposición del acero de refuerzo a agentes oxidantes en la ciudad de Bogotá.

La importancia de este trabajo radica en el incremento del estado de conocimiento frente al estado de desempeño de estructuras de concreto, bajo la acción de agentes contaminantes que causen corrosión en las mismas. Los procesos de corrosión según Pietro Crespi son de análisis numéricos, que consideran tanto mecanismo de falla frágiles y dúctiles, destacan una disminución significativa de la capacidad sísmica de estructuras a medida que aumenta el nivel de corrosión, especialmente para los mecanismos de colapso frágiles que son fuertemente afectados por la condición de mantenimiento. Estas consecuencias empiezan a materializarse después de alrededor de 13 años y medio de exposición de la estructura, lo que podría representar un riesgo para estructuras de mayor edad en dado caso de ocurrir un evento sísmico [1].

En la Universidad Central de Venezuela por ejemplo mencionó en un comunicado que la falta de impermeabilización incrementó el riesgo de que las estructuras colapsen en parte por la corrosión y oxidación del refuerzo [3]. Por otro lado, en el centro de Guadalajara, México, se explica que la oxidación del acero de refuerzo en estacionamientos tienden a aumentar su volumen, generando fuerzas expansivas que provocan fisuración y desprendimientos del concreto, pudiendo ocasionar roturas frágiles en la estructura [4].

Considerando que la ciudad de Bogotá podría empeorar su calidad del aire debido a las sequías y los fuertes vientos que se presentan [5] se espera con este trabajo conocer la influencia de la corrosión en una estructura de concreto considerando la sismicidad de algunas zonas de la ciudad de Bogotá con el fin de tener un punto de partida para la sugerencia de refuerzos o alternativas para mejorar la integridad estructuras de edificaciones que han sido expuestas a agentes contaminantes, la razón por la cual no se realiza este análisis para todos los suelos de la ciudad radica en que la estructura objeto de estudio fue diseñada para cierto grado de sismicidad, la cual solo se da en ciertos suelos de la ciudad.

# Capítulo 3

## PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En el presente trabajo, el problema radica en las características ambientales que afectan al refuerzo de las estructuras de concreto. A continuación, se presenta un árbol de problemas en donde se identifican las problemáticas a nivel general, las cuales se ubican en la raíz del árbol. Estas están directamente relacionadas con temas de calidad de aire, cambio climático y conciencia ambiental. A medida que crece el árbol se identifican problemáticas específicas relacionadas con el efecto de agentes ambientales dañinos para las estructuras en concreto reforzado. Como se puede observar en la Figura 11.2 que la climatología, la contaminación y el impacto ambiental juegan un rol importante en el destino de una sociedad urbanizada. Variables como la duración de los eventos climatológicos y la degradación de recursos naturales por el hombre alteran las dinámicas del ambiente en el que habitan las comunidades, así mismo las políticas públicas ambientales se consideran como una problemática antropocéntrica que desde las mismas comunidades deberían estar enfocadas en mejorar las condiciones del entorno.

En el campo de la ingeniería civil se debe ser consciente que la contaminación es un factor maligno para las estructuras que son construidas, sin embargo, no se puede dejar de lado que esta área de la ingeniería es una de las que más aportan a la contaminación por la explotación de recursos naturales. La reflexión en este punto radica en que tanto la ingeniería civil como otros campos de la sociedad aumen esfuerzos para mitigar esta problemática que aqueja a todas las poblaciones. Centrando el problema en las estructuras de concreto, se puede mencionar que los agentes contaminantes al filtrarse en una matriz de concreto generan óxido férroso y óxido férrico después de tener contacto con el acero de refuerzo, esta oxidación genera una disminución en la capacidad de la estructura, disminuyendo su vida útil e incrementando la incertidumbre frente a su comportamiento durante un evento sísmico.

### 3.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es la influencia de la exposición del acero de refuerzo a agentes oxidantes en el desempeño sísmico de una estructura de concreto en la ciudad de Bogotá?

Figura 3.1: Árbol de problemas



Fuente: Adaptado de [6] y [7]

# Capítulo 4

## MARCO DE REFERENCIA

### 4.1. MARCO TEÓRICO

La construcción en concreto armado tomo varias décadas antes de convertirse en una técnica común desde mediados del siglo XX en Colombia, la investigación sobre el desarrollo de la técnica constructiva en Bogotá ha tenido contribuciones dispersas sobre el origen y evolución de los sistemas técnicos de la edificación de obra construida la cual ha venido siendo observada y detallada básicamente desde su valoración formal.

A partir de los archivos de obra en concreto armado diseñados por los ingenieros Doménico Parma y Guillermo González Zuleta en la segunda mitad del siglo XX, se han planteado momentos y dinámicas del desarrollo de la tecnología del concreto armado en el país que aportan elementos de juicio para narrar la experiencia y logros de la construcción colombiana en periodos productivos. En 1962 Doménico Parma luego de brindar grandes aportes en proyectos de estructuras, tipos de maquina y estudios teórico-experimentales decide crear su propia oficina de proyectos siendo pionero y fundador de varias empresas de transformación de materiales y equipos, realizó sus más grandes proyectos en las dos décadas siguientes hasta su muerte en 1987.

El concreto armado ha sido uno de los materiales de construcción más empleados a lo largo de la historia reciente. Puentes, presas, túneles, edificios, y otras muchas infraestructuras de todo el mundo han empleado esta técnica, su alta resistencia a las vibraciones y a las altas temperaturas.

Los efectos y antecedentes que se tienen en la evolución del concreto de concreto armado desarrollan inquietud para investigar a fondo mejoras continuas que eviten deterioros y corrosiones que tengan una vida útil más extensa.

El impacto del cambio climático y los riesgos de deterioro de la infraestructura de hormigón armado es un desafío global. Respecto al contenido de esta propuesta a continuación se muestra una recopilación de la información basada en teorías que se aplicarán en el desarrollo de esta investigación.



#### 4.1.1. Concreto confinado (Modelo Mander)

Se desarrolla un modelo de esfuerzo-deformación para el concreto sometido a carga compresiva uniaxial y confinada por refuerzo transversal. La sección de concreto puede contener cualquier tipo general de acero confinante: aros en espiral o circulares o aros rectangulares.

La influencia del refuerzo tiene en cuenta varios tipos de confinamiento definiendo una tensión de confinamiento lateral efectiva, que depende de la configuración del refuerzo transversal y longitudinal, un balance energético enfocado en la predecir de la deformación longitudinal por compresión en el concreto correspondiente a la primera fractura de la armadura transversal, equiparando la capacidad de energía de deformación del refuerzo transversal con la energía de deformación almacenada en el concreto como resultado del confinamiento.

El esfuerzo de confinamiento lateral en dirección X se expresa como:

$$f_{lx} = \frac{A_{sx}}{sd_c} f_{th} = \rho_x f_{yh} \quad (4.1)$$

Y en la dirección Y como:

$$f_{ly} = \frac{A_{sy}}{sd_c} f_{th} = \rho_y f_{yh} \quad (4.2)$$

En donde:

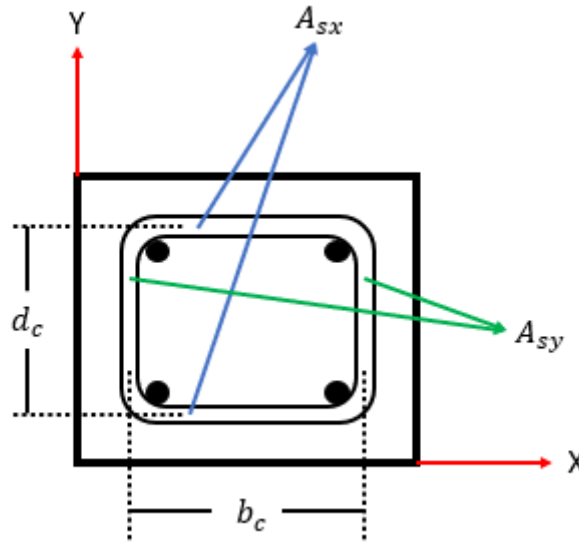
$A_{sx}$ : Área total de las barras transversales en dirección X del plano horizontal

$A_{sy}$ : Área total de las barras transversales en dirección Y del plano horizontal

$s$ : Separación entre ejes centroidales del refuerzo transversal  $f_{yh}$ : Esfuerzo de fluencia del refuerzo transversal  $d_c$ : distancia entre ejes centroidales de estribos extremos en dirección Y del plano horizontal

$b_c$ : distancia entre ejes centroidales de estribos extremos en dirección X del plano horizontal

Figura 4.1: Sección transversal de un elemento estructural



Fuente: propia

En una sección circular, el refuerzo transversal confina toda la sección de concreto, sin embargo, en una sección rectangular, cierta área del concreto no se beneficiará del confinamiento de los refuerzos, esta área se calcula a través de la siguiente expresión:

$$A_i = \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6} \quad (4.3)$$

En donde  $w'_i$  es la distancia libre entre barras longitudinales adyacentes.

Por otro lado, la expresión utilizada para el cálculo del área efectiva; es decir, el área de concreto que sí está siendo confinada por el refuerzo es:

$$A_e = \left( b_c d_c - \sum_{i=1}^n \frac{(w'_i)^2}{6} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right) \quad (4.4)$$

En donde  $s'$  es la separación libre del refuerzo transversal

Con el fin de tener en cuenta el área efectiva confinada, es calculado un coeficiente que multiplica al esfuerzo de confinamiento lateral a través de la expresión:

$$k_e = \frac{A_e}{A_c c} \quad (4.5)$$

En donde:

$$A_c c = A_c (1 - \rho_{cc}) \quad (4.6)$$

$$\rho_{cc} = \frac{A_{long}}{A_{nucleo_{sec}}(A_c)} \quad (4.7)$$

$$A_c = b_c d_c \quad (4.8)$$

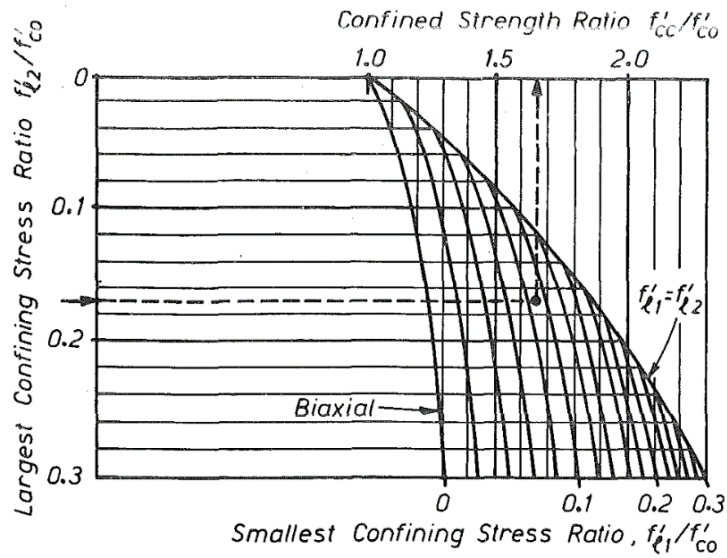
Se obtiene entonces:

$$f'_{lx} = k_e \rho_x f'_{yh} \quad (4.9)$$

$$f'_{ly} = k_e \rho_y f'_{yh} \quad (4.10)$$

Mediante la siguiente gráfica es posible determinar la resistencia a la compresión del concreto confinado.

Figura 4.2: Razón de confinamiento



Fuente: Adaptado de [8]

El modelo implica el cálculo de la deformación en el punto de esfuerzo a compresión del concreto confinado mediante la siguiente expresión:

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{c0} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} \right) - 1 \right] \quad (4.11)$$

Donde:

$\epsilon_{c0}$ : deformación longitudinal del concreto por compresión.

Para una tasa de deformación lenta (cuasi estática) y una carga monotónica, el esfuerzo a la compresión longitudinal  $f_c$  viene dada por:

$$f_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r - 1 + x^r} \quad (4.12)$$

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad (4.13)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (4.14)$$

$$E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (4.15)$$

Donde:

$E_c$  = Módulo de elasticidad del concreto.

#### 4.1.2. Carbonatación del concreto

En el trabajo realizado por Crespi et al. Titulado "On the collapse evaluation of existing RC bridges exposed to corrosion under horizontal loads" [1] se presentan las ecuaciones que rigen tanto la degradación de la resistencia del concreto como la pérdida de sección transversal.

Degradación del acero de refuerzo:

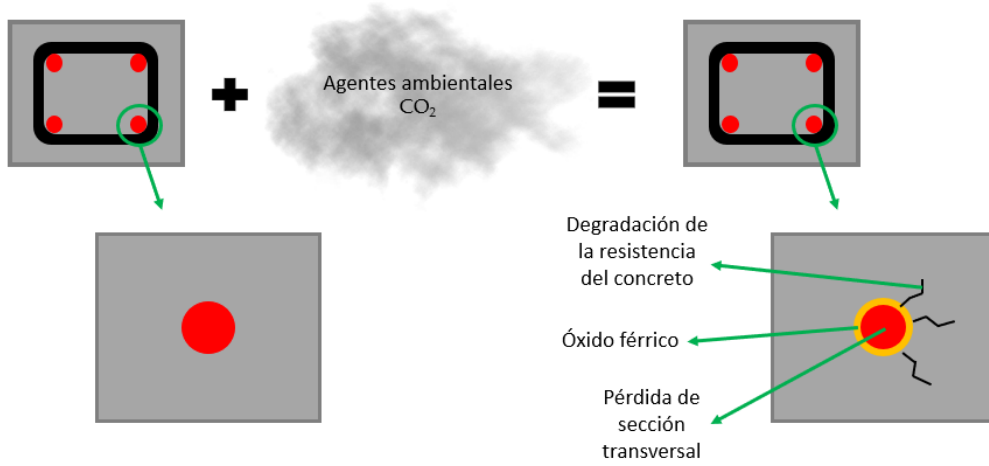
$$d(t) = d_0 - 2P_x = d_0 - 2i_{corr}k(t - t_i) \quad (4.16)$$

Donde:

$d(t)$  = Diámetro del refuerzo después de la corrosión.

En donde,  $d_0$  es el diámetro inicial del refuerzo,  $i_{corr}$  es la densidad media de corrosión,  $k$  es la tasa de penetración de la carbonatación,  $t$  es el tiempo de servicio y  $t_i$  corresponde al tiempo necesario para desarrollar una capa de carbonatación igual al recubrimiento del concreto

Figura 4.3: Carbonatación del concreto



**Fuente:** propia

Degradación de la resistencia en la matriz de concreto:

$$f'_{c_{corr}} = (1 - \lambda) f'_c \quad (4.17)$$

Donde:

$f'_{c_{corr}}$ : Resistencia a la compresión del concreto después de la corrosión.

$f'_c$ : Resistencia a la compresión inicial del concreto.

$$\lambda = 2,265 C_w - 1,61 \quad (4.18)$$

En donde  $C_w$  es el grado de corrosión [1] [2].

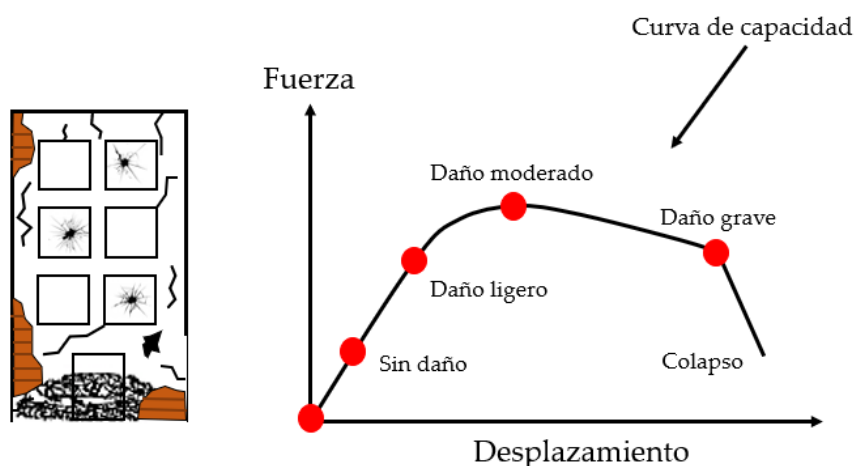
#### 4.1.3. Análisis estático no lineal (Pushover)

Apéndice A-3 — Procedimiento no lineal estático de plastificación progresiva “Pushover”

- Este Apéndice es nuevo en el Reglamento NSR-10, no es de carácter obligatorio y se ha incluido con el fin de que se estudie preliminarmente para poderlo adoptar en ediciones futuras del Reglamento, si se considera conveniente.
- Los requisitos alternos sugeridos en él provienen del documento NEHRP 2006(36).

La necesidad de un método simple para predecir el comportamiento no lineal de una estructura bajo cargas sísmicas inició con lo que se conoce como el Análisis Pushover (PA). en donde se demuestra como la falla progresiva en los edificios realmente ocurre, e identifica el modo de falla final. es decir, este análisis estima la capacidad de resistencia de una estructura más allá de su límite elástico hasta su máxima resistencia en el rango plástico [9].

Figura 4.4: Análisis Pushover



Fuente: propia

La Figura 4.4 muestra un ejemplo de una curva de capacidad. Al lado izquierdo se evidencia la estructura en una condición de daño grave, posteriormente a este estado la estructura pierde totalmente la capacidad para absorber energía sísmica y es entonces cuando se produce el colapso de la misma.

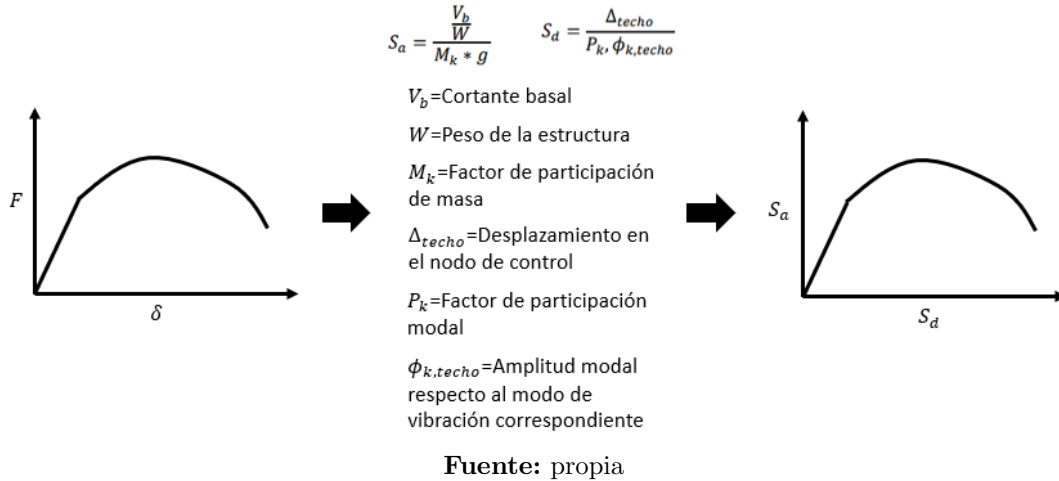
En este caso utilice Un triángulo de cargas para el protocolo, se aplica de arriba hacia abajo, (arriba la parte mas grande) lo hice más por recomendación de la literatura(existen varios patrones; sin embargo, para edificios bajos y simétricos como el que utilice de 5 pisos este es el que más se adapta al comportamiento de la estructura)

Se ubica la sección transversal fuerte de las columnas en el sentido X de la edificación para realizar el análisis Pushover, me guie del artículo que fue del cual base mi proyecto.

## Transformación ADRS

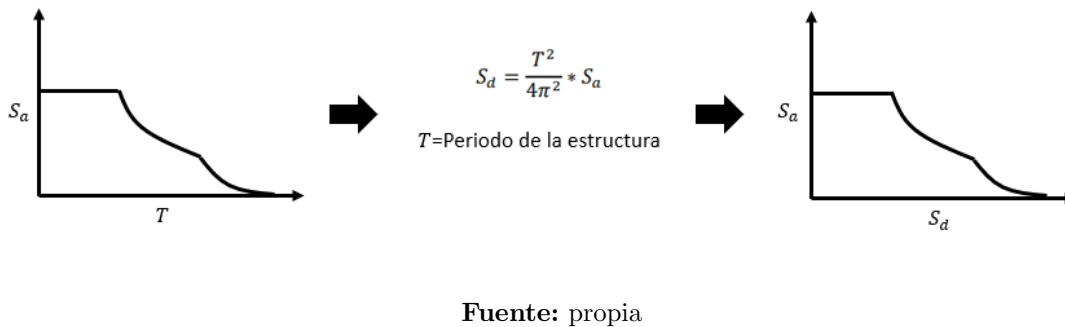
### Acceleration Displacement Response Spectrum

Figura 4.5: Transformación de la curva de capacidad



Con un análisis estático no lineal se estima la capacidad de una estructura, por otro lado, a través de la curva de demanda, se estima la influencia del sismo sobre la estructura. Dado que ambas curvas consideran coordenadas diferentes, con el fin de traslaparlas y obtener el punto de desempeño de la estructura se utiliza la metodología ADRS, en la que ambas curvas son transformadas a las mismas coordenadas.

Figura 4.6: Transformación de la curva de demanda



En donde:

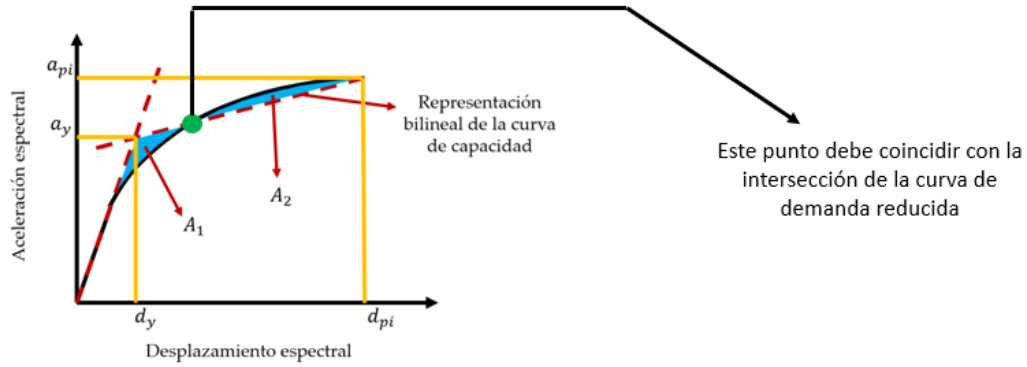
$S_a$ : Aceleración espectral  $S_d$ : Desplazamiento espectral.

### Reducción de La curva

Inicialmente se debe calcular la curva bilineal de capacidad, mediante la intersección de dos líneas, la primera tangente al rango elástico de la curva, y la segunda

ubicada tal que el  $A_1$  sea igual al  $A_2$ .

Figura 4.7: Representación bilineal de la curva de capacidad



**Fuente:** Adaptado de ATC

A continuación, es calculado el coeficiente de amortiguación viscosa equivalente  $\beta_0$ . Y adicionalmente un coeficiente  $k$  en función del tipo de comportamiento estructural los cuales se dividen en tres:

1. *Tipo A:*  
Representa ciclos de histéresis estables, razonablemente completos, y se le asigna un  $k$  de 1.0
2. *Tipo B:*  
Representa una reducción moderada de área y se le asigna un  $k$  básico de 2/3.
3. *Tipo C:*  
Representa ciclos histeréticos deficientes con una reducción sustancial del área del ciclo y se le asigna un  $k$  de 1/3.

$$\beta_0 = \frac{63,7(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} \quad (4.19)$$

$$\beta_{eff} = k\beta + 5 = \frac{63,7k(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \quad (4.20)$$

Una vez calculado el coeficiente se procede a hallar los coeficientes de reducción SRA para la zona de la meseta de la curva de demanda, y SRV para el resto de valores de la curva mediante las siguientes expresiones:

$$SRA = \frac{3,21 - 0,681Ln(\beta_{eff})}{2,12} \quad (4.21)$$



$$SRV = \frac{3,31 - 0,41Ln(\beta_{eff})}{1,65} \quad (4.22)$$

También existen valores mínimos admisibles para dichos coeficientes de reducción, en función al tipo de comportamiento estructural

Cuadro 4.1: Tipo de comportamiento estructural

Tipo de comportamiento estructural	SRA	SRV
Tipo A	0.33	0.5
Tipo B	0.44	0.56
Tipo C	0.56	0.67

#### 4.1.4. Espectro de diseño

Tomando los valores utilizados en los cálculos que miden la reacción de una estructura ante la vibración del suelo que la soporta se puede identificar como responde la estructura a las acciones inducidas del sismo. La curva que define el coeficiente sísmico para el diseño y revisión de una estructura específica ubicada en un sitio en particular. Por otro lado, la microzonificación sísmica a través de las características que muestran las unidades litológicas las cuales reaccionan generalmente con suelos en eventos como terremotos provocando inestabilidad estructural en los edificios es lo que describe el comportamiento de los suelos bajo la circunstancia de una fuerza externa. Por estas razones para la ciudad de Bogotá se definió mediante decreto 523 del 16 de diciembre del 2010 (Pagina 5 de 21) que se adopta a la microzonificación sísmica de Bogotá D.C.

Figura 4.8: Parametros a considerar

#### Parámetros a considerar:

- $A_a$  = Aceleración horizontal pico efectiva de diseño.  $A_a = 0.15$  g
- $A_v$  = Aceleración que representa la velocidad horizontal pico efectiva de diseño.  $A_v = 0.20$  g
- $A_0$  = Aceleración horizontal pico efectiva del terreno en superficie (g)
- $F_a$  = Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos cortos
- $F_v$  = Coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de períodos intermedios
- $I$  = Coeficiente de importancia
- $S_a$  = Aceleración espectral (g)
- $T$  = Período de vibración (s)
- $T_C$  = Período corto (s)
- $T_L$  = Período largo (s)

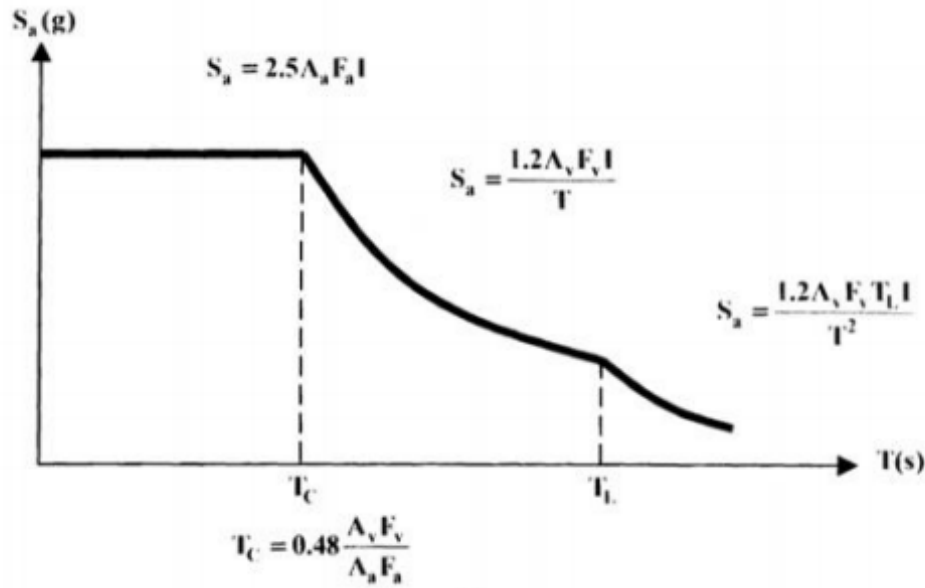
Fuente: Adaptado de Alcaldía de Bogotá, 2010

Cuadro 4.2: Coeficientes de diseño

Zona	Fa	Fc	Tc	TI	Ao
Cerros	1,35	1,30	0,62	3,0	0,18
Piedemonte A	1,65	2,0	0,78	3,0	0,22
Piedemonte B	1,95	1,70	0,56	3,0	0,26
Piedemonte C	1,80	1,70	0,60	3,0	0,24
Lacustre-50	1,40	2,90	1,33	4,0	0,21
Lacustre-100 A	1,30	3,20	1,58	4,0	0,20
Lacustre-200 B	1,20	3,50	1,87	4,0	0,18
Lacustre-300 C	1,05	2,90	1,77	5,0	0,16
Lacustre-500	0,95	2,70	1,82	5,0	0,14
Lacustre aluvial-200	1,10	2,80	1,63	4,0	0,17
Lacustre aluvial-300	1,00	2,50	1,60	5,0	0,15
aluvial-50	1,35	1,80	0,85	3,5	0,20
aluvial-100	1,20	2,10	1,12	3,5	0,18
aluvial-200	1,05	2,10	1,28	3,5	0,16
aluvial-300	0,95	2,10	1,41	3,5	0,14
Depósito ladera	1,65	1,70	0,66	3,0	0,22

Curva de diseño para un coeficiente de amortiguamiento de 5 % del critico

Figura 4.9: Espectro de diseño



Fuente: Adaptado de [10]

## 4.2. MARCO CONCEPTUAL

Descripción de las palabras que tienen en el documento, todo basado en terminología encontrada en artículos publicados de revistas de alto impacto.

### Traviesas

Generalmente las traviesas se encuentran montadas sobre la base de la edificación con el objetivo de no transmitir vibraciones a la estructura y también para que cuando se presente un evento sísmico el funcionamiento que ellas tengan en cuanto al sonido sea de manera moderada [8].

### Tensión transversal

Es una fuerza ejercida en sentido longitudinal, es decir, que cabe la posibilidad de que aumente el área de la sección, teniendo en cuenta la importancia en el módulo de elasticidad, las cargas y que el área sea constante mientras lo que varía sea la sección para decretar como incide está en el desempeño estructural [11].

### Refuerzo multiaxial

Se pueden incorporar refuerzos multiaxiales en las estructuras que cumplan con las propiedades específicas en la combinación de elementos y distintos componentes en el caso de aplicaciones novedosas a la estructura [11].

### Pruebas biaxiales y triaxiales

Este tipo de pruebas teóricamente afirman la falla que se tiene en el material por la adaptación crítica de esfuerzo normal y un esfuerzo acelerado [11].

### **Carbonatación**

Es una reacción que sufren para este caso las estructuras a consecuencia del dióxido de carbono, que provoca la degradación a la resistencia del concreto [2].

### **Microzonificación**

Es una forma de trabajo adecuado que se utiliza para medir la reducción del riesgo sísmico en ciudades, además evalúa los efectos probables que permita crear estrategias en zonas con estas condiciones locales del suelo.

### **Acero**

Material de composición de hierro y aleación de carbono, es un material que predomina para la realización de vigas de acero.

### **Oxido ferrico**

Material no tóxico libre de alteraciones con tonalidad roja, resistente a la exposición al aire durante largos periodos de tiempo.

### **Dioxido de carbono**

molécula lineal sin olor ni color compuesta por un átomo de carbono y dos de oxígeno.

### **Capacidad estructural**

Pavimento que soporta las cargas para la estructura durante el periodo de vida útil.

### **Demanda sísmica**

Esta se representa mediante un espectro de respuesta máxima en un sistema de grado de libertad evidenciando frecuencias generadas ante el sismo.

### **Pushover**

es un procedimiento de análisis con su paso a paso que imita las deformaciones inelásticas progresivas en una estructura hasta su falla total.

## ESTADO DEL ARTE

Figura 5.1: Clusters encontrados en VOSviewer



El principal aporte de esta investigación es Interiorizar de manera específica un modelo avanzado con una trayectoria moderna aplicado en otros países el análisis sísmico de vigas de concreto con corrosión y con la estructura sana. Ya que este usa un lenguaje interpretado, y su código puede ser creado y modificado dinámicamente, Todos los comandos pueden ser redefinidos o sobrescritos de manera dinámica, esto lo hace ser más sencillo; La propuesta del análisis sísmico de vigas de concreto después de ser sometido a un proceso de corrosión acelerada, teniendo en cuenta como Yu Chen menciona en su artículo la Influencia de la ubicación de la corrosión del refuerzo sísmico. En este trabajo se definen los conceptos claves proyectados como parte de la investigación experimental sobre el comportamiento de estructuras resistentes a momentos de concreto armado corroídas; en los procesos de degradación que tiene el material por causa del agrietamiento generado por los agentes oxidantes al que fue expuesto el material aplicando un análisis de fatiga [12] del material ante cargas sísmicas para hallar el lugar en donde se encuentra reflejado el grado de carbonatación al que se vio afectado el material.

Por otro lado, el aporte de Di Carlo, Fabio [13] se centra en la importancia que tiene realizar una evaluación numérica que brinde un resultado en el comportamiento del elemento corroídos mediante un diagrama de carga-Deriva, la primera formación de grietas y la posterior evolución de grietas deben ser examinadas en detalle [14]. Uno de los resultados principales obtenidos es que la progresión del daño tanto de las muestras no corroídas con agrietamiento por flexión de viga y el daño final se manifiesta a través de la degradación por cizallamiento de la junta [15]. La idea anterior que nace del autor Kanchana devi [16] describe acerca de la energía acumulada disipada por la corrosión no dúctil y dúctil corroída, Sin embargo, se evidencia un vacío en la forma de utilizar un material recursivo para mantener la ductilidad que resista los posibles daños ocasionados por fuerzas sísmicas [17]. En este proyecto también se encontraron conceptos detallados acerca del comportamiento sísmico de columnas de concreto armado que brindan una idea abierta acerca de las causas de corrosión en el acero [18].

En otro análisis realizado por Dizaj, Ebrahim en el año 2018 en donde probabilísticamente denota la vulnerabilidad sísmica de pórticos de concreto armado corroídos, incluida la variabilidad espacial de la corrosión por picaduras, brinda una alternativa de diseño futurista de pórticos de concreto armado para minimizar la vulnerabilidad de materiales frágiles en estructuras que han sufrido exposición de agentes oxidantes [19]; es importante involucrar este análisis de estructuras en concreto reforzado las cuales aún no han sido desarrolladas en la ciudad de Bogotá.

Li, Yao mediante un texto construido en 2019 explica un avance con un enfoque que en este momento no se puede aplicar en la ciudad en la cual se estima realizar este proyecto porque faltan estudios más pertinentes y profundos relacionados con la aplicación del TRC que abran un panorama diferente ya que, literalmente en este texto se adquiere un conocimiento más profundo de columnas RC reforzadas con (TRC) concreto armado textil. las columnas corroídas que fueron reforzadas por TRC mostraron mejor comportamiento sísmico después de pasar por el cloruro,

sin embargo, estos avances pueden ser atractivos en construcciones venideras en el campo civil [20].

En un artículo del año 2019 varios autores entre ellos Chanchi Golondrino expusieron como título en su investigación “Rendimiento sísmico de conexión de fricción de edificio de acero: efectos de corrosión”, el cual tiene una relación directa con los efectos que pueden llegar a provocar la corrosión si no se toman medidas correctivas [21]. La forma del bucle de histéresis no cambia con la corrosión, El coeficiente de fricción efectivo cambió con el tratamiento de la superficie [22]. Esta aceptación que brindan estos autores podría tener mayor referencia al cambio climático y sus consecuencias en las estructuras corroídas.

Existen algunos métodos de análisis unificado para predecir el desempeño mecánico a largo plazo de estructuras de acero considerando la corrosión, la reparación y el sismo. También se recopila a través de histogramas los comportamientos de las estructuras ante fuerzas sísmicas, lo que permite predecir de manera probabilista el efecto de la corrosión en el tiempo [23]. Sin embargo, se considera que aún falta la etapa de validación de este estudio con una estructura real sometida a fuerzas sísmicas producidas naturalmente.

Según Shamsoddini Motlagh, el índice de resiliencia sísmica para edificios escolares típicos de concreto reforzado considerando los efectos de la corrosión por carbonato se requieren para la comprensión en elaboración de estructuras [2], brindar conceptos que evalúan los índices de riesgo activos tomando como ejemplo la corrosión en un edificio escolar. De esta investigación se extraen los modelos de degradación de la resistencia del concreto después de procesos de corrosión en el refuerzo [24].

La incorporación de energía en el ciclo de vida de las estructuras de concreto reforzado considerando la corrosión inducida por cloruros en regiones sísmicas da una idea del tiempo de servicio que se pueda determinar una estructura en concreto reforzado. Los resultados calculados muestran que la probabilidad de falla, disminuye con el aumento de los años y La energía incorporada consumida en reparación aumenta dramáticamente a medida que el daño sísmico empeora. En el año Crespi Pietro habla acerca del colapso de puentes RC la cual considera modelos de construcción entre los que se desarrollan análisis y estudios que implican una variable de efectos secundarios en la elaboración de puentes, edificios, vías y demás [1], pero específicamente el trabajo de cargas horizontales en puentes aporta que los niveles leves de corrosión conducen a reducciones insignificantes del área de las barras de acero y, en consecuencia, no influyen en los valores de la índices de riesgo obtenidos para ambos mecanismos de colapso considerados [25]. De este artículo se extrae el modelo de reducción de área del acero de refuerzo después de verse sometido a efectos de oxidación [11]. Para la actualidad la probabilidad siempre va a ser un factor clave en cualquier estudio, análisis, riesgo, etc [26]. Por esa razón el análisis probabilístico es lo que brinda como primera medida la decisión de realizar o no un proyecto bajo condiciones y requisitos que cumplan con los parámetros necesarios

en el diseño de la obra planteada. En esta investigación se encuentra que el método propuesto es capaz de cuantificar la variación temporal en probabilidades de daño de edificios de gran altura bajo excitación sísmica y carbonatación del concreto [27].



# Capítulo 6

## OBJETIVOS

### 6.1. OBJETIVO GENERAL

Comparar el desempeño sísmico de una estructura en condición no oxidada con la misma estructura bajo la exposición de oxidación en el refuerzo.

### 6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir la curva de capacidad en formato ADRS de la estructura en condición tanto normal como oxidada brindando un resultado eficaz para elegir cual es el estudio correcto que se debe aplicar para lograr evitar un debilitamiento considerable en la estructura
- Construir la curva de demanda con base en las características de cada zona de la ciudad de Bogotá mediante formato ADRS(Acceleration Displacement Response Spectrum)
- Determinar mediante un modelo comparativo la capacidad de la estructura en condición normal y en condición oxidada.

# Capítulo 7

## ALCANCES Y LIMITACIONES

### 7.1. ALCANCES

La intensión de este trabajo se basa en la comparación de las curvas de capacidad de la estructura objeto de estudio considerando dos escenarios; la estructura sin carbonatación, y la estructura con carbonatación bajo un índice moderado de contaminación.

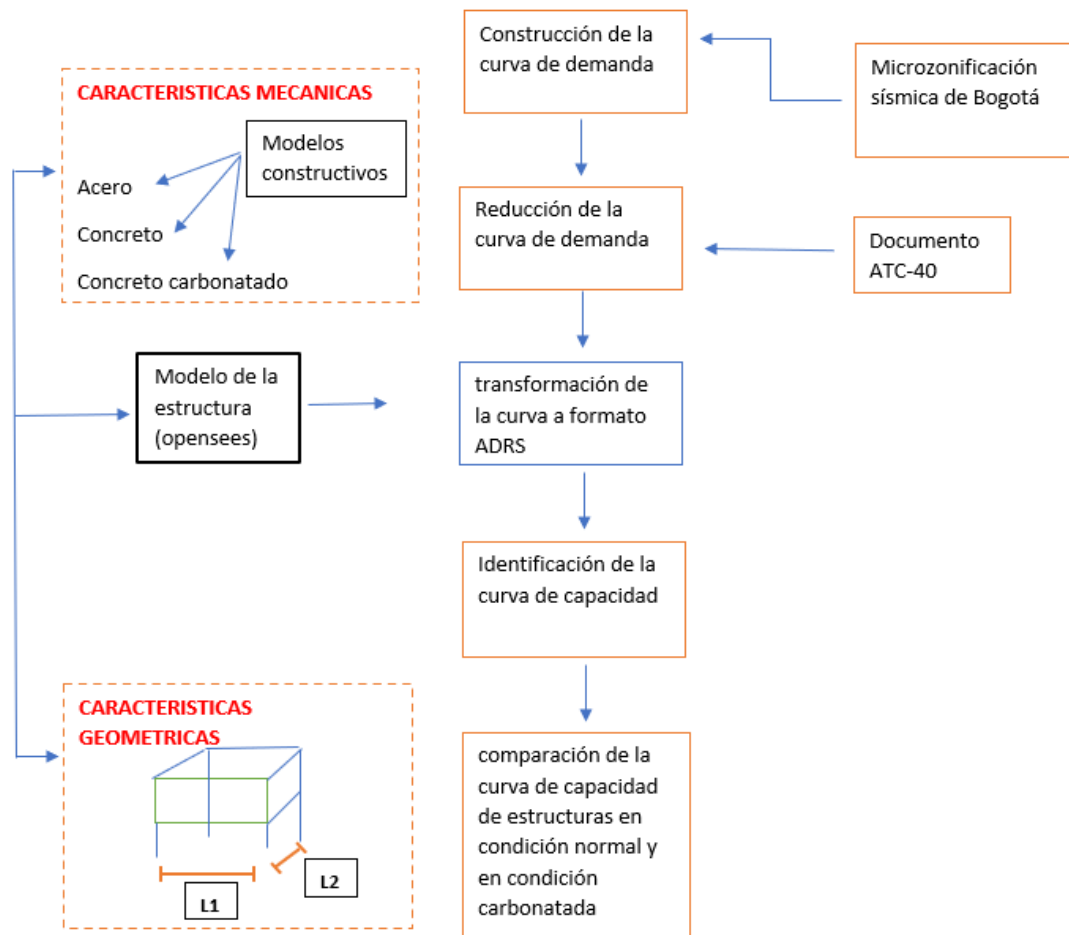
### 7.2. LIMITACIONES

- El diseño de la estructura se hizo con Eurocodigo y no con NSR-10.
- Los niveles de carbonatación son sugeridos por la literatura.
- Se podria hacer un analisis más detallado de los agentes contaminantes en la ciudad de Bogotá D.C. para lograr ajustar los modelos propuestos en la documentacion real de la ciudad.
- Este proyecto no se puede hacer para todos los suelos de la ciudad de Bogotá D.C. ya que esta restringido por el diseño bajo ciertas solicitaciones sismicas las cuales no son aplicables en todos los suelos de la ciudad.

# Capítulo 8

## METODOLOGÍA

Figura 8.1: Flujograma de la Metodología



Fuente: Propia

### 8.1. FASE 1

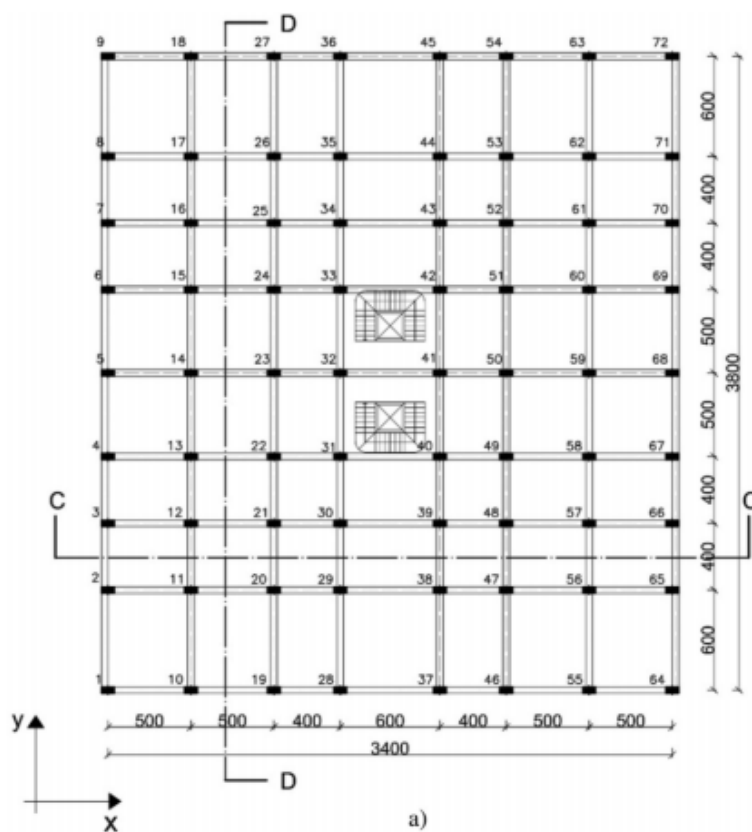
En esta primera fase se hará uso del Software Opensees para la estimación de la curva de capacidad. Este es un software especializado en análisis de estructuras de

codigo abierto en lenguaje TCL (Tool Command Language). A partir del modelo de Mander se construyó la curva esfuerzo - deformacion para el concreto confinado, la cual se ingresó al software como material constitutivo del concreto. El modulo de elasticidad que se considerara para el concreto es:

$$E_c = 3900\sqrt{f'_c} \quad (8.1)$$

Así mismo se construye la curva esfuerzo – deformacion de un acero de 200 GPa de modulo de elasticidad y de 420 MPa de esfuerzo a la fluencia. La estructura que tendra en cuenta es la siguiente:

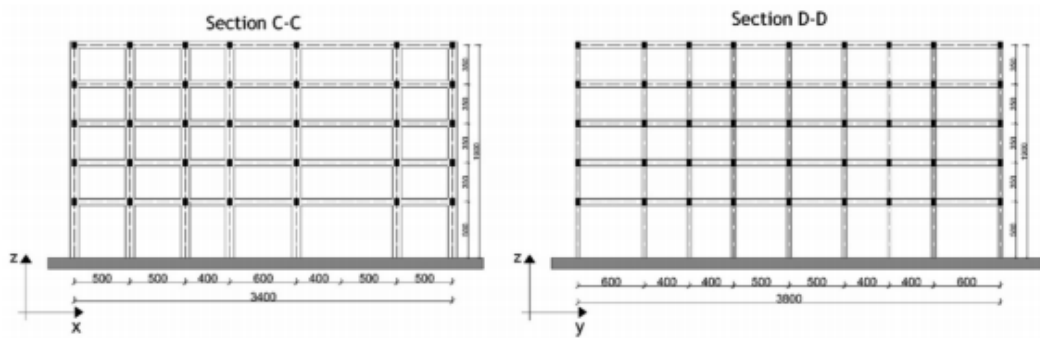
Figura 8.2: Planta del modelo a analizar



**Fuente:** adaptado de [28]

Las unidades de estas estructuras se encuentran en centímetros.

Figura 8.3: Alzado del modelo a analizar



Fuente: adaptado de [28]

Esta es una estructura encontrada en la literatura la cual sirve como base para el analisis de la presente investigacion.

Figura 8.4: Viga típica de la estructura modelo

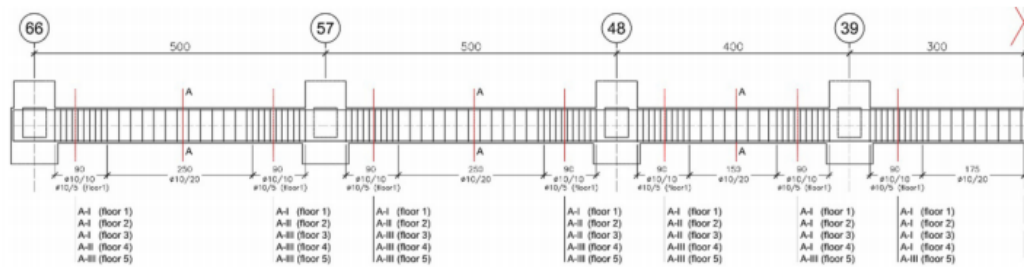
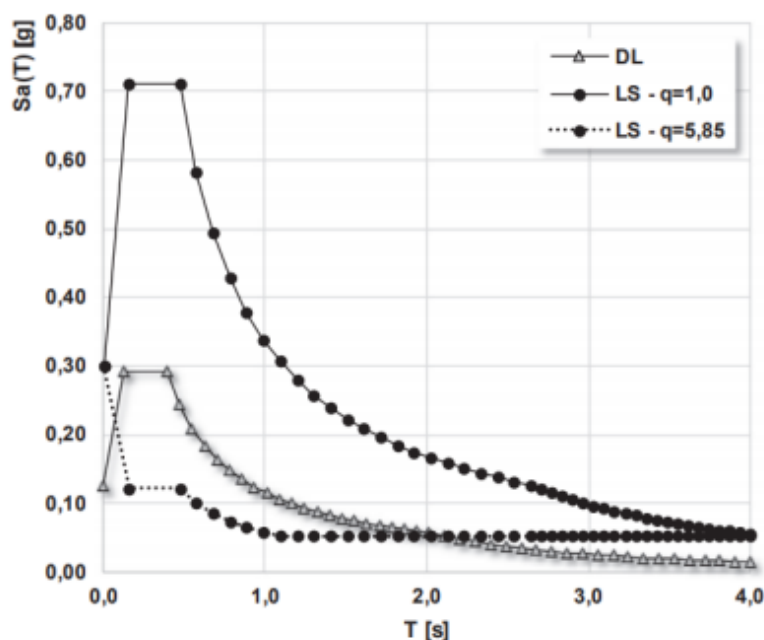


Figura 8.5: Espectro utilizado en el diseño del modelo



Fuente: adaptado de [28]

Espectros de respuesta (estados límite LS y DL) utilizados para el diseño de edificios. El edificio fue diseñado para la clase de alta ductilidad (HDC); El espectro de respuesta se basó en la vida de referencia efectiva de la estructura (VR), definida en función de la vida nominal (VN) y del uso. coeficiente (CU). La vida nominal VN se asumió igual a 50 años, CU era unitario y la vida de referencia resultante de la RV era de 50 años. Estado límite de seguridad de vida (LS), con respecto a la resistencia y los daños Estado límite de limitación (DL), en cuanto a rigidez y desplazamientos

Luego se analizó cada uno de los suelos de la ciudad de Bogotá D.C. para generar sus respectivos espectros (se escoge el más aproximado respecto al utilizado en el diseño del modelo). Las zonas que se van a estudiar son: Cerros, Piedemonte A, Piedemonte B, Piedemonte C, Lacustre-50, Lacustre-100, Lacustre-200, Lacustre-300, Lacustre-500, Lacustre aluvial-200, Lacustre aluvial-300, Aluvial-50, Aluvial-100, Aluvial-200, Aluvial-300, Deposito ladera.

### 8.3. FASE 3

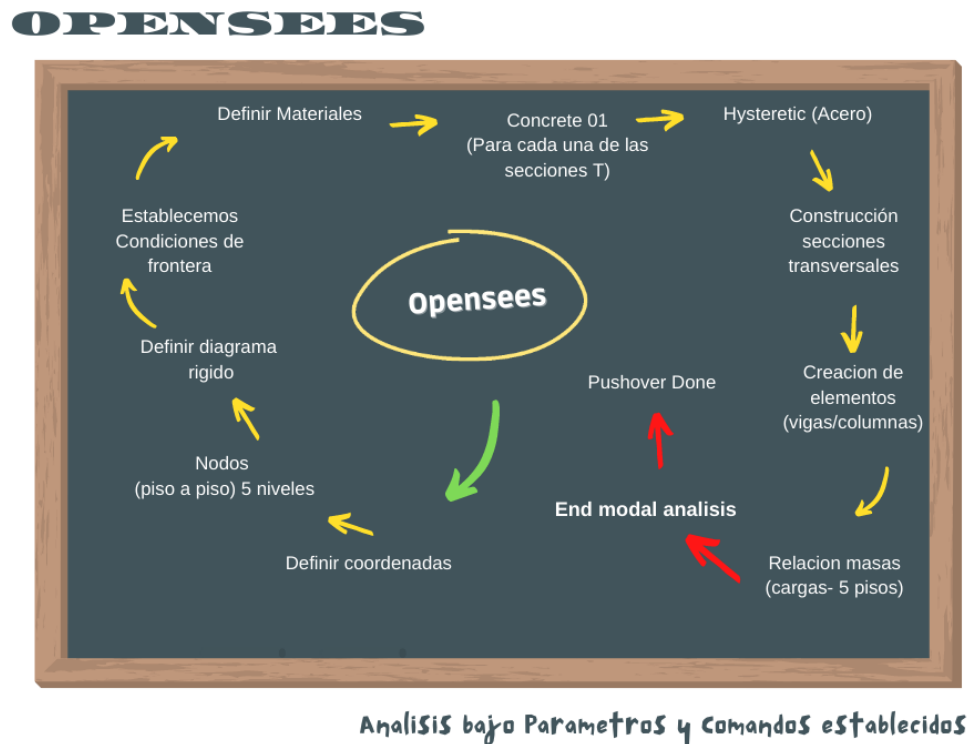
Basados en los resultados obtenidos en la Fase 1 y 2 se procede a determinar mediante un modelo comparativo las dos curvas de capacidad que se obtengan para su respectivo análisis y evidenciando el comportamiento bajo carbonatación y sin

carbonatacion.

Las curvas de capacidad se generaran mediante el aplicativo opensees, el siguiente fluograma explicara el paso a paso para la elaboracion del anterior punto mencionado.

Todo bajo comandos especificos que ayudaran a la determinacion y respectivo analisis de la estructura.

Figura 8.6: Flujograma Procedimiento Openses



**Fuente:** adaptado de openses

Mediante el anterior flujograma se evidencia el proceso para la construcción de las curvas de capacidad de las estructuras en concion carbonatada y sin carbonatacion, este es un analisis a fondo con cada uno de sus componentes y elementos definidos para la obtencion de los resultados.



# Capítulo 9

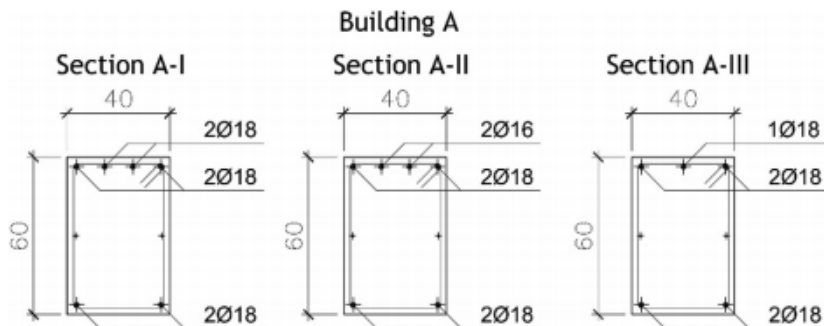
## DESCRIPCIÓN DEL MODELO

### 9.1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Basado en las características geométricas de la estructura A del artículo base [28], se definen las secciones de las vigas y las secciones de las columnas establecidas.

#### 9.1.1. Secciones Vigas

Figura 9.1: Secciones de Vigas



Fuente: [28]

Toda esta información la traslado a OpenSees para empezar a definir cada uno de los comandos y que el programa genere las curvas de capacidad.

Los programas como Sap 2000, Etabs, manejan modelos de plasticidad concentrada (se crean rotulas plásticas al inicio y al final de los elementos estructurales (vigas-columnas) en los extremos. Los modelos de plasticidad distribuida son los que analizamos número de secciones en un elemento, en el OpenSees se establece el npi (número puntos de integración) lo definí con 5 para los elementos más largos y 3 para los elementos pequeños, esto quiere decir que OpenSees va a analizar 5 veces una cuadrícula de la sección transversal del elemento).

Los resultados van a ser más precisos que un modelo de plasticidad concentrada que solo está en los extremos de los elementos, pero no en los medios.

Se empieza definiendo el comando model BasicBuilder donde se establece el (ndm) que es el número de dimensiones con las que se va a trabajar en la cual se ingresa 3 (x,y,z), el (ndf) es otra variable que define el número de grados de libertad de los nodos los cuales son 6 (3 traslaciones y 3 rotaciones en los respectivos ejes); en (source) se ingresan las librerías necesarias para las unidades: toneladas(T) y metros(m).

### 9.1.2. Secciones Columnas

Figura 9.2: Secciones de Columnas



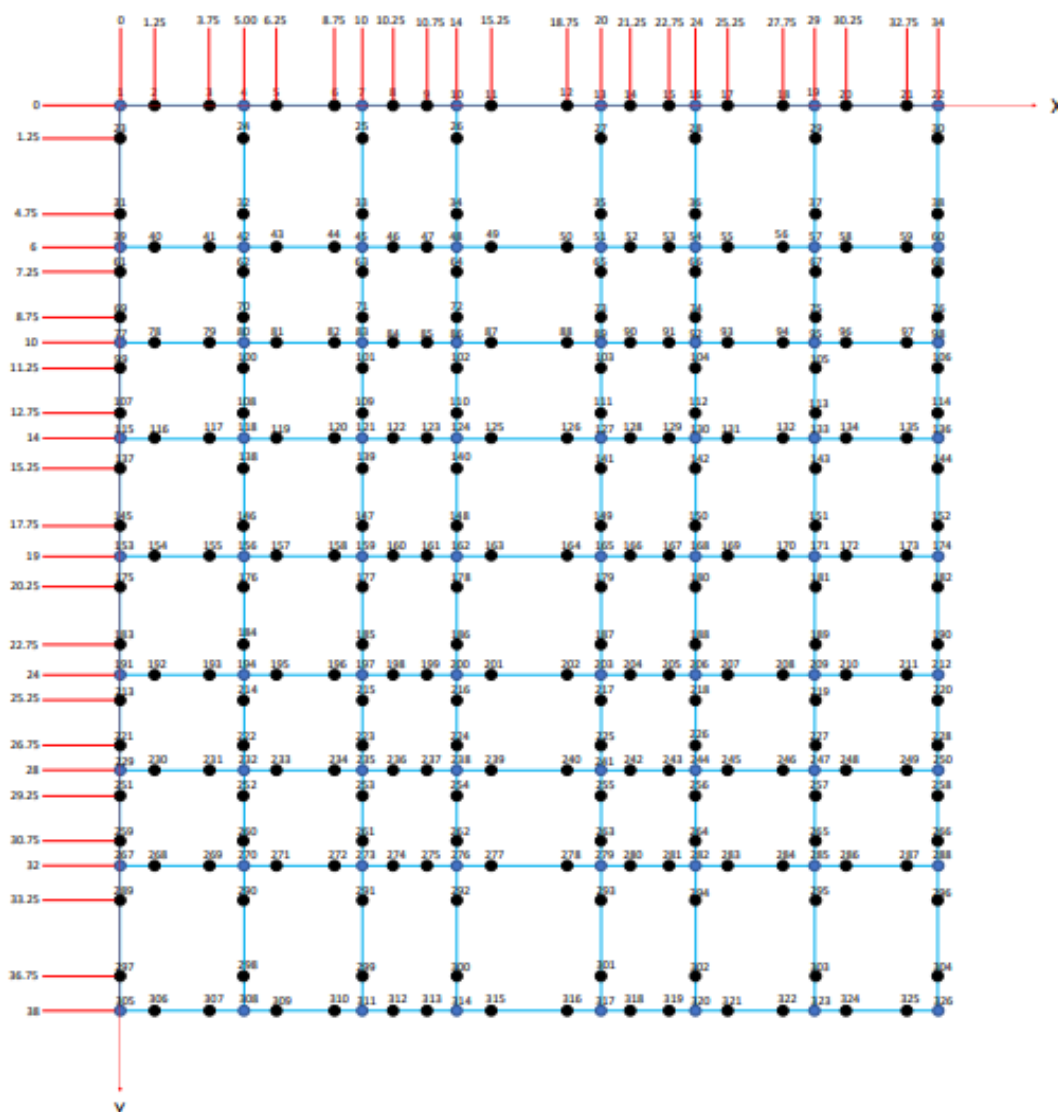
Fuente: [28]

En (setup) y (source) se define el comando BuildRCrectSection, el cual permite la construcción de la sección transversal requerida. También se tuvo que añadir otro parametro conocido como BuildRCrectSectionMod el cual fue una modificación hecha al código base de BuildRCrectSection para poder garantizar que hallan barras de diferentes calibres en la parte superior e inferior de las secciones, por que por lo general en el software viene predeterminado para que solo se puedan establecer barras de un mismo calibre arriba y abajo.

Con el comando (node) se especifica el id y el (x,y,z); Opensees maneja un sistema de coordenadas en donde el (y) es la altura y las coordenadas (x, y z) están en el plano, así mismo este sistema cartesiano se basa en la regla de la mano derecha.

Se establecen las coordenadas de la estructura (A) para conocer los nodos y poderlos asignar en OpenSees. La subdivisión de los nodos se basó en las longitudes en donde cambia el refuerzo de confinamiento en una viga.

Figura 9.3: Coordenadas Edificio



Fuente: Propia

Luego de tener todas las coordenadas de la estructura con sus respectivos nodos, son ingresados en el programa debidamente organizado para el nivel 0, 1, 2, 3, 4 y 5, piso a piso.

Posteriormente se define el diafragma rígido, donde se establece que todos los nodos que estén en un mismo piso se comporten de la misma manera, lo primero es definir un nodo de control en el cual se aplica la fuerza horizontal del método pushover, esto para que los demás se comporten de la misma manera que el nodo de control; y lo nombran en OpenSees como "node"10000 para el nivel 1, 20000 para el nivel 2, 30000 para el nivel 3, 40000 para el nivel 4 y 50000 para el nivel 5.

Con el comando (fix) se definen los grados de libertad para los grados de control, este comando considera una codificación binaria, en donde (0) representa el grado de libertad y (1) representa el grado de libertad restringido. Los nodos quedan definidos de tal forma que en el eje x y z los nodos se puede desplazar, en y no se puede desplazar ya que la idea es que no se desplace en la altura.

El comando para establecer los nodos rigidos es (rigidDiaphragm), luego se definen las condiciones de frontera que son apoyos articulados que permiten la rotacion pero no la traslacion del nodo. Es importante resaltar que se establecen las áreas de los calibre de las varillas de las secciones transversales a utilizar, la forma en la que se definen variables en Opensees es con el comando (set). Se definen las constantes A14, A16, A18 y A20 para el acero número 14, 16, 18 y 20 respectivamente (la notación de los acero es europea). El recubrimiento se define mediante el comando (set) bajo el nombre (cover) y el valor que se utiliza es de 0.04m. Se define a su vez el concreto confinado mediante el comando (set) con el nombre (matTagConfAI).

Posteriormente se define el material que se va a utilizar mediante el comando (uniaxialMaterial), en este caso se utilizo (Concrete01). El cual depende de: (fpc-conf), (epsc0conf), (fpcuconf) y (epsUconf), de las cuales se hablará más adelante.

Se realiza el mismo procedimiento para cada una de las secciones transversales (vigas y columnas). Se define el concreto no confinado mediante el comando (set) con el nombre (matTagNoConf).

Para establecer las varillas de refuerzo se realiza mediante el comando (set) con el nombre (matTagSteel). Se utiliza el comando Hysteretic para la construcción del material constitutivo del acero, el cual es recomendado por la literatura. Después de tener definidos los materiales, se crea la seccion transeversal mediante el comando (BuildRCrectSection), la cual depende de los siguientes comandos internos para definir cada una de sus partes.

(id HSec BSec coverH coverB coreID coverID steelID numBarsTop barAreaTop numBarsBot barAreaBot numBarsIntTot barAreaInt nfCoreY nfCoreZ nfCoverY nfCoverZ).

Donde:

id - etiqueta para la sección que es generada por este procedimiento.

HSec profundidad de la sección, a lo largo del eje y local.

BSec - ancho de la sección, a lo largo del eje local-z.

cH - distancia desde el límite de la sección hasta el eje neutral del refuerzo.

cB - distancia desde el límite de la sección hasta el lado del refuerzo.

coreID - etiqueta de material para el parche central.

coverID - etiqueta de material para los parches de la cubierta.

steelID - etiqueta de material para el acero de refuerzo.

numBarsTop: número de armaduras en la capa superior.

numBarsBot: número de armaduras en la capa inferior.

numBarsIntTot: número total de armaduras en las capas intermedias, simétricas con respecto al eje  $zy$  2 barras por capa, debe ser un número entero par.

barAreaTop - área de la sección transversal de cada barra de refuerzo en la capa superior.

barAreaBot: área de la sección transversal de cada barra de refuerzo en la capa inferior.

barAreaInt - área de la sección transversal de cada barra de refuerzo en la capa intermedia.

nfCoreY: número de fibras en el parche central en la dirección  $y$ .

nfCoreZ: número de fibras en el parche central en la dirección  $z$ .

nfCoverY: número de fibras en los parches de la cubierta con lados largos en la dirección  $y$ .

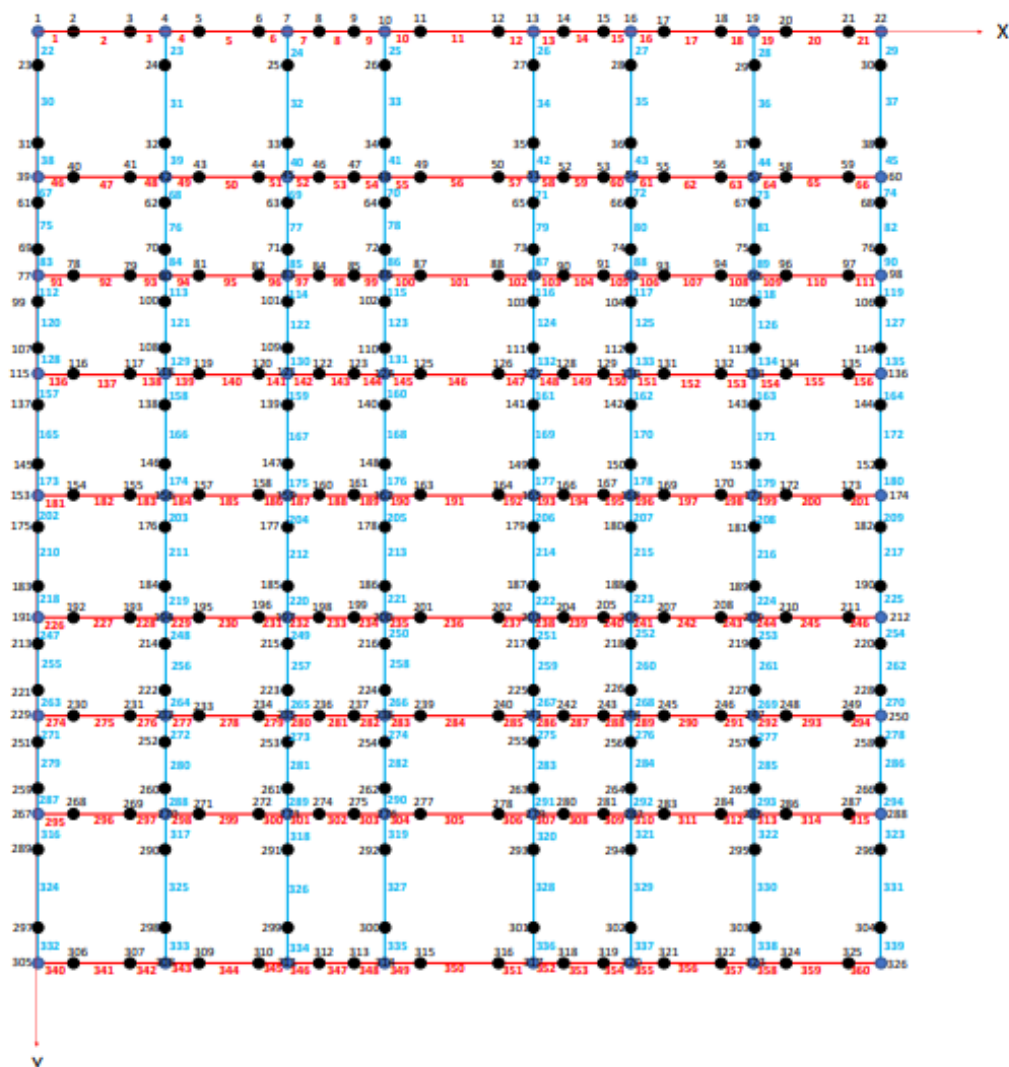
nfCoverZ: número de fibras en los parches de la cubierta con lados largos en la dirección  $z$ .

Luego de construir la seccion transversal, ingresó un nuevo comando que modifique para poder colocar barras internas de diferente calibre en la zona tanto superior como inferior de la sección transversal. El comando que se define es (BuildRCrectSectionMod), en donde se añade (numBarsTopInter = Número de barras intermedias de la zona superior) (barAreaTopInter = Calibre de barras intermedias de la zona superior) (numBarsBotInter = Número de barras intermedias de la zona inferior) (barAreaBotInter = Calibre de barras intermedias de la zona inferior). Esto con el fin de hacer lo que se menciono anteriormente y para cada una de las secciones transeversales (vigas y columnas).

Avanzo a definir la transformación geométrica mediante el comando (geomTransf) esto para definir el sentido que tiene el eje fuerte de una seccion transversal.

Posteriormente realizo la creacion correspondiente de vigas y columnas mediante los comandos (element) (forceBeamColumn) y estos valores se tomaron de los elementos evaluados de la siguiente manera:

Figura 9.4: Elementos Edificio



Fuente: Propia

Como este es un modelo que se realiza por fibras se define el comando (np) el cual corresponde a los puntos de integración del elemento, para que haya convergencia en el modelo se establecieron 3 puntos de integración para las vigas en las zonas de confinamiento, y 5 para las vigas en las zonas de no confinamiento y las columnas. Se realiza este mismo procedimiento para cada uno de los pisos de la estructura.

Luego de construir y establecer las vigas y columnas defino las masas, esto mediante el comando (mass) para cada uno de los nodos en el eje (x y z), dado que matrices deben ser ortogonales. en (y) no se establece masa porque el modelo no se desplaza en la altura.

Este procedimiento lo repito para cada uno de los pisos (niveles) como se viene

haciendo en los anteriores pasos.

Ahora defino el analisis pushover mediante los parámetros (IDctrlNode) (FreeNodeID), estos definen el nodo de control que se esta analizando (en el analisis pushover siempre se utiliza el nodo de control del techo).

Posteriormente defino mediante el comando (Dmax) el desplazamiento maximo al cual puede llegar la estructura antes de parar el codigo, cuando la estructura llega a dicho valor se detiene y muestra los resultados. Mediante el comando (Dincr) se establece el incremento de la fuerza que se le esta aplicando a la estructura.

## 9.2. DISTRIBUCIÓN DEL REFUERZO

En el artículo [28] se encuentran las características y parametros establecidos para la estructura mencionada. A continuación se presenta la figura 11.2 con las dimensiones de las secciones transversales y sus respectivos refuerzos.

Columns	Sect.	Stirrups	Long. reinf.
Floor I	40 × 80	φ10/5	12φ16 + 4φ18
Floor II	40 × 70	φ10/10	10φ16 + 4φ18
Floor III	40 × 60	φ10/10	8φ16 + 4φ18
Floor IV	40 × 60	φ10/10	8φ16 + 4φ18
Floor V	40 × 60	φ10/10	8φ16 + 4φ18

Figura 9.5: Dimensiones de secciones y refuerzos para columnas

Fuente: [28]

Cuadro 9.1: Refuerzos en Secciones

Pisos	Vigas	Tipo	Estribo (I)	Estribo (E)	Culumnas	Tipo	Estribo
Piso 1	0,4X0,6	A-I	10/20	10/10	0,4X0,8	C-I	10/5
Piso 2	0,4X0,6	A-I	10/20	10/10	0,4X0,7	C-II	10/10
Piso 3	0,4X0,6	A-I	10/20	10/10	0,4X0,6	C-III	10/10
Piso 4	0,4X0,6	A-II	10/20	10/10	0,4X0,6	C-IV	10/10
Piso 5	0,4X0,6	A-III	10/20	10/10	0,4X0,6	C-V	10/10

## 9.3. ZONA DE AMENAZA SÍSMICA

Tomando como base el decreto 523 del 2010 el cual habla de la microzonificacion sismica de la ciudad de Bogota D.C. Se inicia con la identificación de los coeficientes de diseño encontrados en dicho documento tomando como referencia el espectro sísmico de la ciudad de Bogota D.C.

Lo anteriormente nombrado bajo los parametros de la aceleracion horizontal pico efectiva de diseño que se toman de (Aa)=0.15 g, la aceleracion que representa la velocidad horizontal pico efectiva de diseño de (Av)=0.20 g, la aceleración horizontal

pico efectiva del terreno en superficie esta en (g), el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos ( $F_a$ ), el coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios ( $F_v$ ), el coeficiente de importancia ( $I$ ), la aceleración espectral ( $S_a$ ) en (g), el periodo de vibración ( $T$ ) en (s), el periodo corto en segundos (s) y el periodo largo en segundos (s).

Se procede a realizar los calculos pertinentes para la construir de los espectros en cada una de las zonas, se tienen en cuenta dos variables  $S_a$  (g) y  $T$ (s).

Despues de analizar el espectro destinado en el diseño del modelo que se encuentra en el articulo [28], se realiza el análisis de los diferentes tipos de suelos en la ciudad de Bogotá y se evidencia que al finalizar la construcción de cada uno el que más se aproxima es el espectro de Piedemonte B.



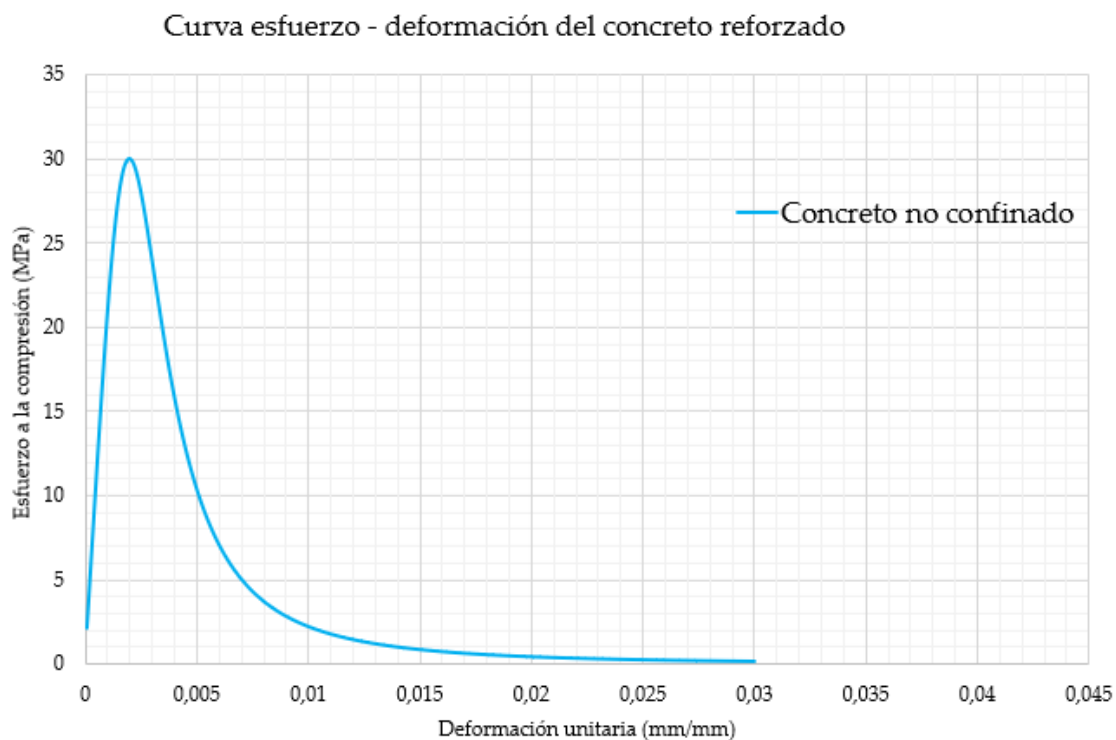
# Capítulo 10

## MATERIALES CONSTITUTIVOS

### 10.1. CONCRETO NO CONFINADO

En el concreto no confinado se establece la curva esfuerzo - deformacion que es el esfuerzo a la compresion vs la deformacion unitaria del concreto anteriormente mencionado.

Figura 10.1: Concreto no confinado



Fuente: Propia

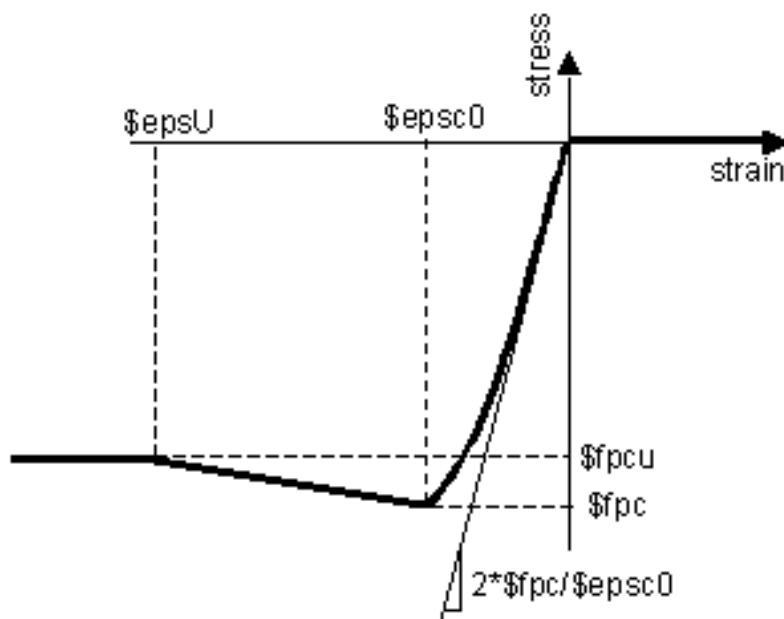
Esta se usa solamente para el recubrimiento el cual se coloca en Opensees definido con el nombre (cover) y el valor que se estableció es de 0.04m.

Se evidencia un alto esfuerzo a la compresion en las primeras deformaciones pre-determinadas de la estructura. El parámetro y curva del concreto no confinado se

evalua para cada una de las secciones transversales.

En el concreto no confinado el material que se utilizó y evaluó mediante el comando (unialMaterial) en el software Opensees, en este caso se utilizó (Concrete01).

Figura 10.2: Relación tensión-deformación del material-concrete01



Fuente: Opensees

Esta es la relación Esfuerzo - deformación definida para el (concrete01). Los parámetros de concreto a compresión deben ingresarse como valores negativos; La pendiente inicial para este modelo es  $(2 fpc/epsc0)$  como recomendación de la literatura. Este comando se utiliza para construir el objeto del material de concreto propuesto por (Kent-Scott-Park) con rigidez de descarga / recarga lineal degradada según el trabajo de (Karsan-Jirsa) y sin resistencia a la tracción.

El material se ingresa con el comando (unialMaterial) predeterminado en Opensees y bajo los siguientes parámetros internos:

- matTag = material de identificación de etiqueta de número entero.
- fpc = resistencia a la compresión del concreto a los 28 días (la compresión es negativa).
- epsc0 = deformación del concreto a la máxima resistencia.
- fpcu = resistencia al aplastamiento del concreto.
- epsU = deformación del concreto a la resistencia al aplastamiento.

## 10.2. CONCRETO CONFINADO

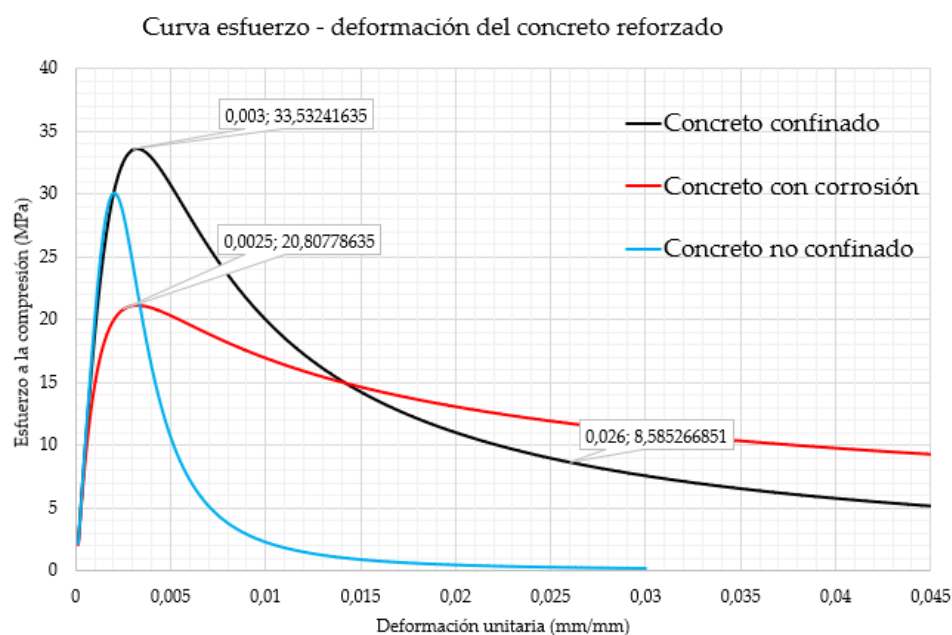
En este material constitutivo se obtuvieron las curvas esfuerzo - deformación entre las siguientes 3: (realizadas bajo parámetros y condiciones de diseño establecidas en la norma); Concreto Confinado, Concreto con Corrosion y Concreto no Confinado.

Esto se lleva a cabo con cada una de las secciones (vigas - columnas), y la resistencia confinada del concreto a partir de esfuerzos de confinamiento laterales para secciones rectangulares. El modelo implica el cálculo de la deformación en el punto de esfuerzo a compresión del concreto confinado. El número al final del nombre de la sección se refiere a la separación del refuerzo de confinamiento en centímetros(cm).

### 10.2.1. Seccion A-I-10

Cada una de las secciones aquí mencionadas estan evaluadas bajo parámetros y características de diseño definidos anteriormente y con los calculos debidamente estructurados para obtener valores confiables y veridicos.

Figura 10.3: Seccion A-I-10

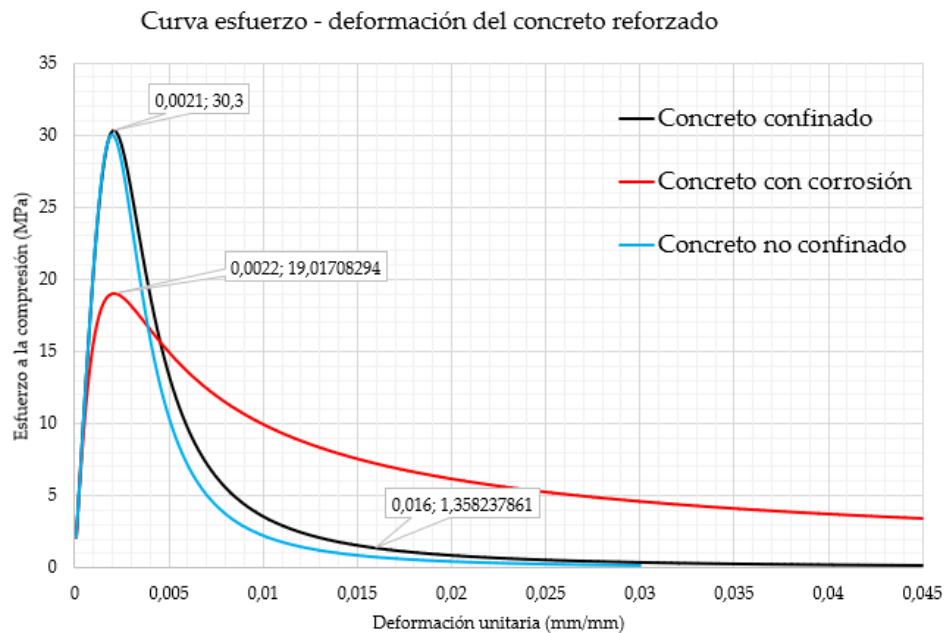


Fuente: Propia

En la seccion A-I-10 se evidencia un mayor esfuerzo a la compresion en el concreto confinado e índices más bajos que en el concreto con corrosión.

### 10.2.2. Seccion A-I-20

Figura 10.4: Seccion A-I-20



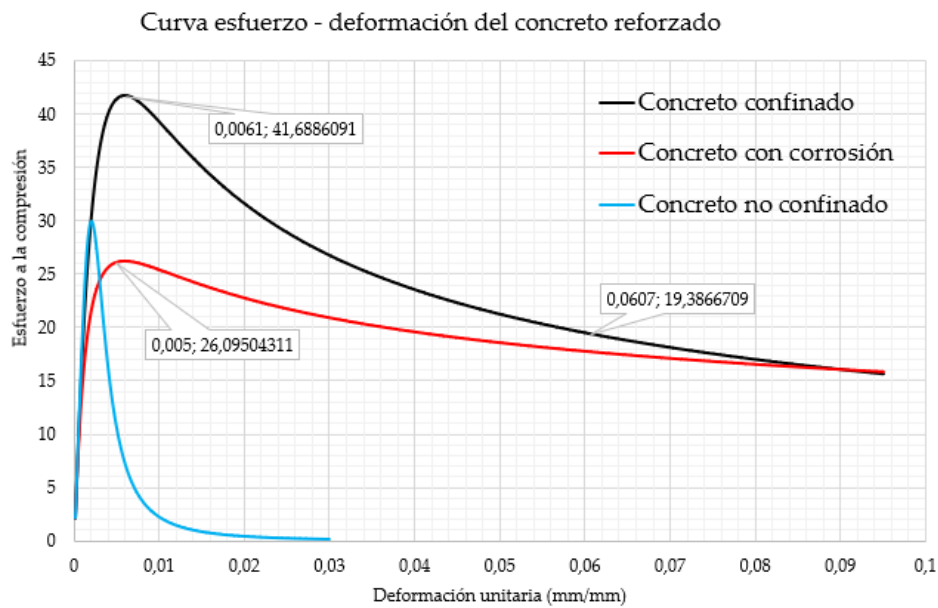
Fuente: Propia

En la seccion A-I-20 se puede notar que las curvas del concreto confinado y el concreto no confinado estan a la par en el esfuerzo a la compresión y con desplazamiento relativamente constante.

### 10.2.3. Seccion A-II-10

En la seccion A-II-10 se logra ver que el conccrero no confinado se queda corto en desplazamiento y el esfuerzo a la compresión es muy superior en el concreto confinado.

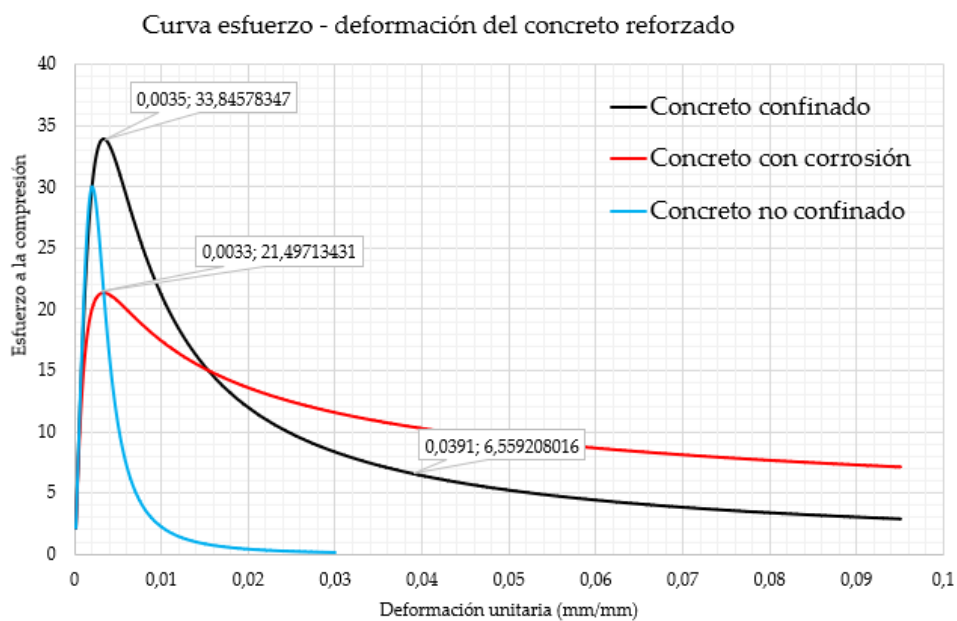
Figura 10.5: Seccion A-II-10



Fuente: Propia

#### 10.2.4. Seccion A-II-20

Figura 10.6: Seccion A-II-20

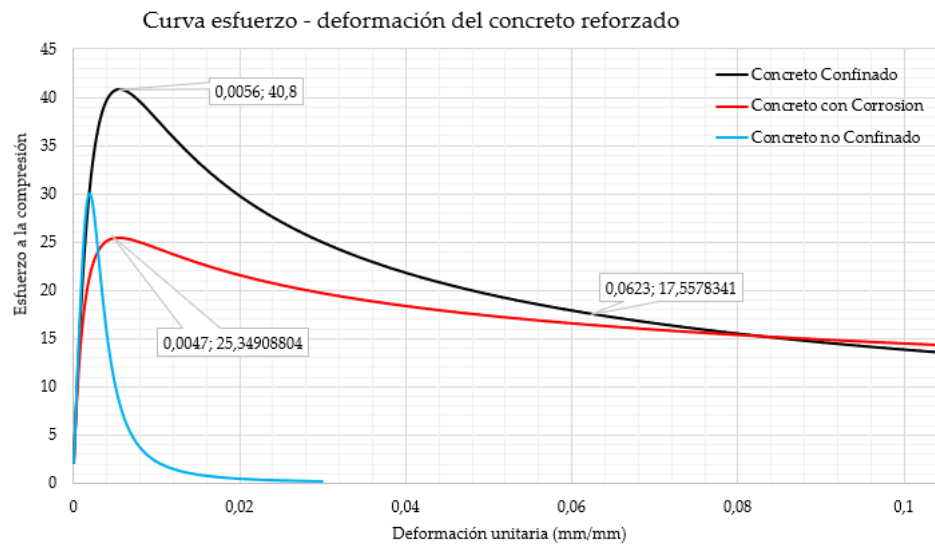


Fuente: Propia

En la seccion A-II-20 se eviencia un nivel de esfuerzo a la compresion medio en el concreto con corrosion.

### 10.2.5. Seccion A-III-10

Figura 10.7: Seccion A-III-10

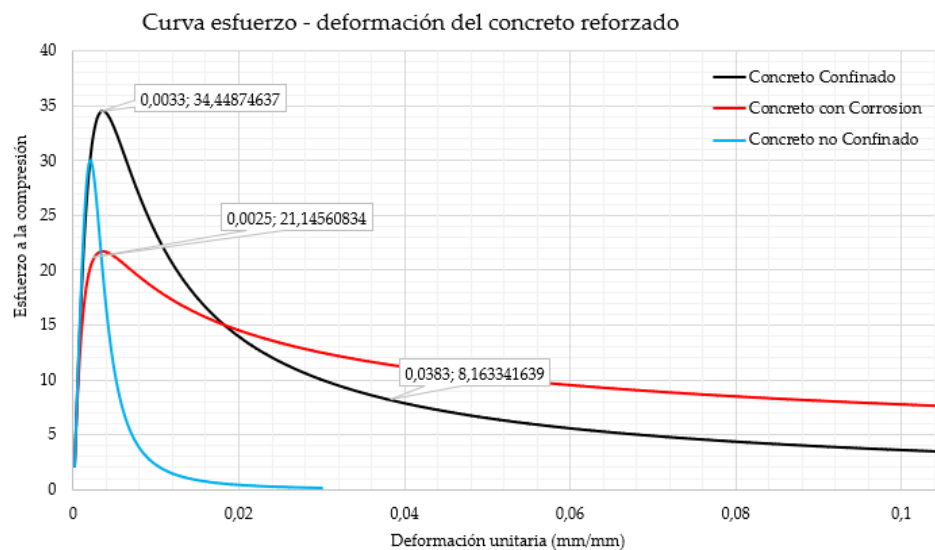


Fuente: Propia

En la seccion A-III-10 se puede inferir que el pico es alto en el concreto confinado respecto a las demás en el esfuerzo a la compresión y en la deformación unitaria se intersecta con la del concreto con corrosión al final.

### 10.2.6. Seccion A-III-20

Figura 10.8: Seccion A-III-20



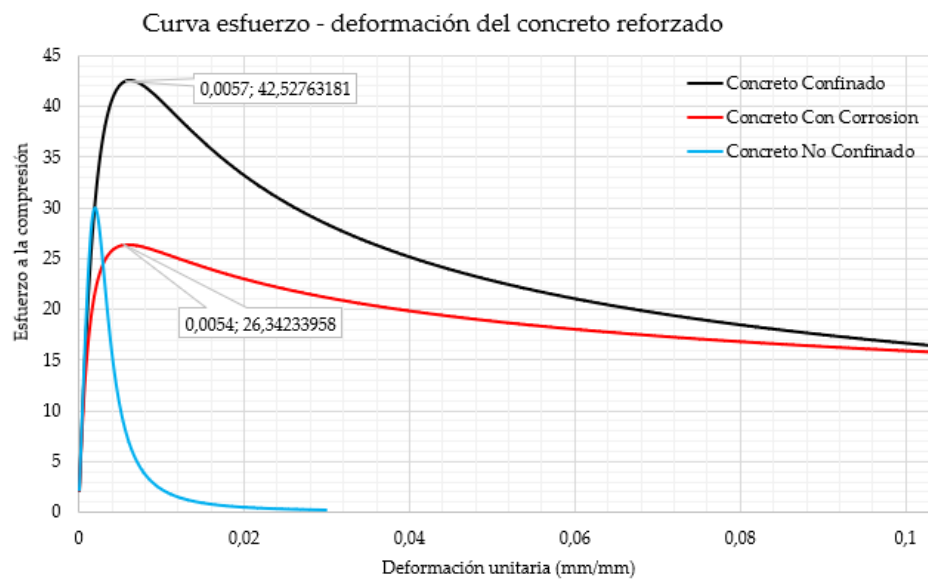
Fuente: Propia

En la sección A-III-20 se ve una gran similitud a la A-II-20 respecto a todos sus componentes.

### 10.2.7. Sección C-I-5

En las secciones de las columnas se establecen cada una con sus respectivas separaciones.

Figura 10.9: Sección C-I-5



Fuente: Propia

En la sección C-I-5 se evidencia una deformación unitaria más corta en el concreto no confinado.



### 10.2.8. Seccion C-II-10

Figura 10.10: Seccion C-II-10

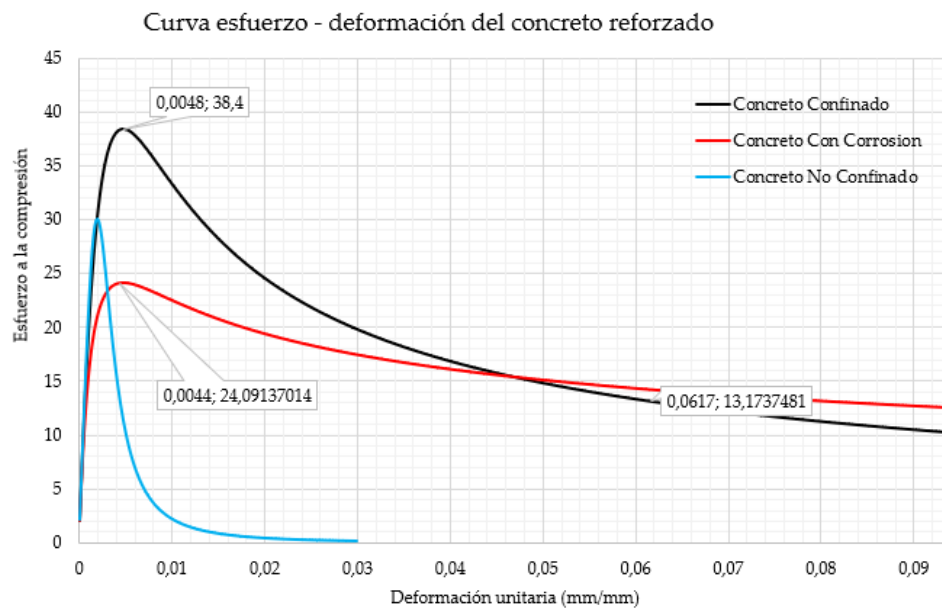


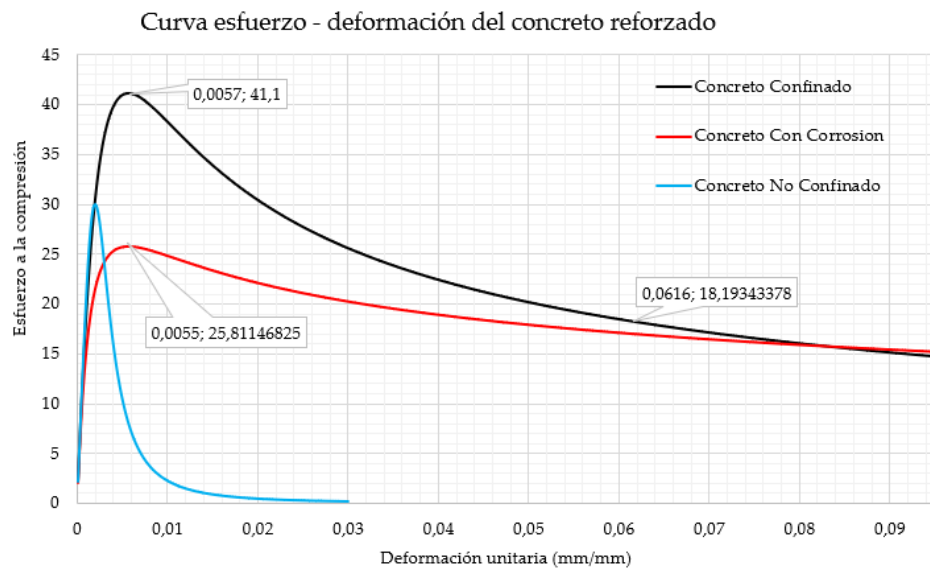
Figura 10.11: Seccion C-II-10

**Fuente:** Propia

En la seccion C-II-10 al final de la deformacion unitaria tiende a elevarse el concreto con corrosión superando al concreto confinado en el esfuerzo a la compresión.

### 10.2.9. Seccion C-III-10

Figura 10.12: Seccion C-III-10

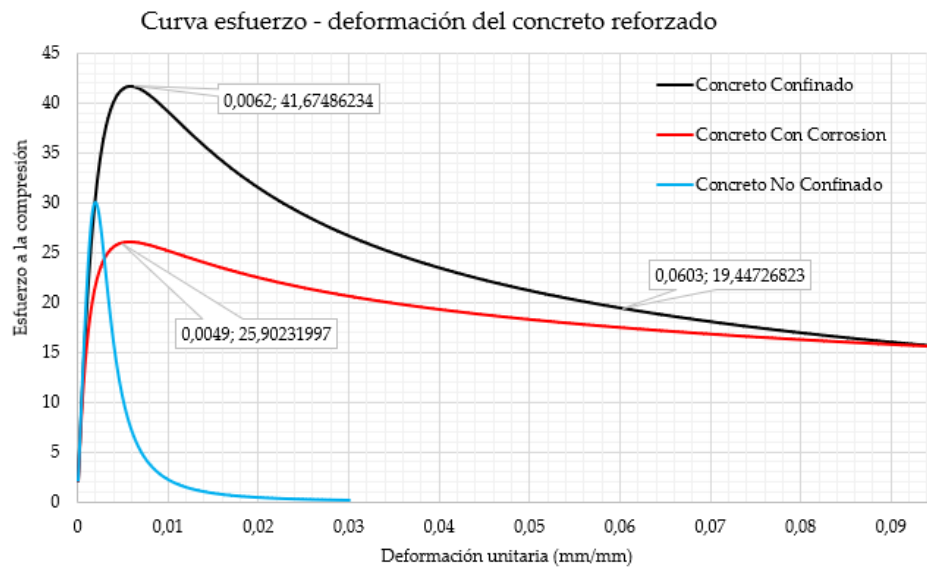


Fuente: Propia

En la sección C-III-10 se evidencia un esfuerzo a la compresión similar al final de la deformación entre concreto confinado y concreto con corrosión; el concreto no confinado muestra un comportamiento más corto en la deformación unitaria.

#### 10.2.10. Sección C-IV-10

Figura 10.13: Sección C-IV-10

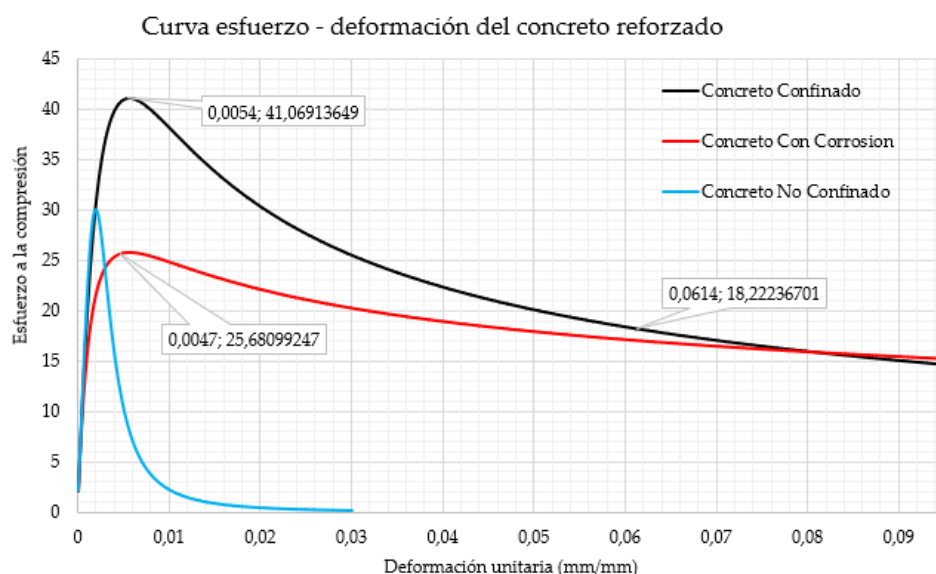


Fuente: Propia

La sección C-IV-10 tiene las mismas características de diseño de la sección C-III-10.

### 10.2.11. Seccion C-V-10

Figura 10.14: Seccion C-V-10



Fuente: Propia

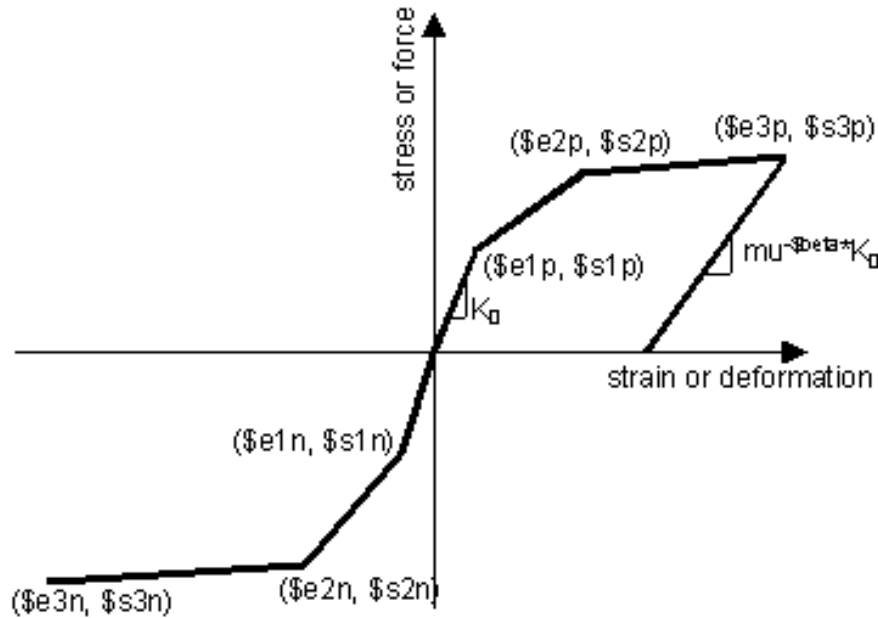
La seccion C-V-10 tiene las mismas características de diseño a las secciones C-III-10 y C-IV-10

## 10.3. ACERO

Para la construcción del material constitutivo de las varillas de refuerzo se utiliza el nombre (matTagSteel), lo que se utilizó para construir el material es un modelo llamado (Hysteretic).

Este comando se utiliza para construir un objeto de material histerético bilineal uniaxial con estrechamiento de fuerza y deformación, daño debido a ductilidad y energía, y rigidez de descarga degradada basada en ductilidad.

Figura 10.15: Relacion tension-deformacion histeretica tipica del material- Hysteretic



Fuente: Opensees

Este material se ingresa con el comando (uniaxialMaterial) predeterminado en Opensees y bajo los siguientes parametros:

matTag = material de identificación de etiqueta de número entero.  
 (s1p) (e1p) = tensión y deformación (o fuerza y deformación) en el primer punto de la envolvente en la dirección positiva.  
 (s2p) (e2p) = tensión y deformación (o fuerza y deformación) en el segundo punto de la envolvente en la dirección positiva.  
 (s3p) (e3p) = tensión y deformación (o fuerza y deformación) en el tercer punto de la envolvente en la dirección positiva (opcional).  
 (s1n) (e1n) = tensión y deformación (o fuerza y deformación) en el primer punto de la envolvente en la dirección negativa.  
 (s2n) (e2n) = tensión y deformación (o fuerza y deformación) en el segundo punto de la envolvente en la dirección negativa.  
 (s3n) (e3n) = tensión y deformación (o fuerza y deformación) en el tercer punto de la envolvente en la dirección negativa (opcional).  
 pinchx = factor de estrechamiento por tensión (o deformación) durante la recarga.  
 pinchy = factor de estrechamiento por esfuerzo (o fuerza) durante la recarga.  
 damage1 = daño por ductilidad: D1 ( $\mu-1$ ).  
 damage2 = daño debido a la energía: D2 ( $E_{ii} / E_{ult}$ ).  
 beta = potencia utilizada para determinar la rigidez de descarga.  
 degradada basada en la ductilidad,  $\mu\text{-}\beta$  (opcional, predeterminado = 0.0).

# Capítulo 11

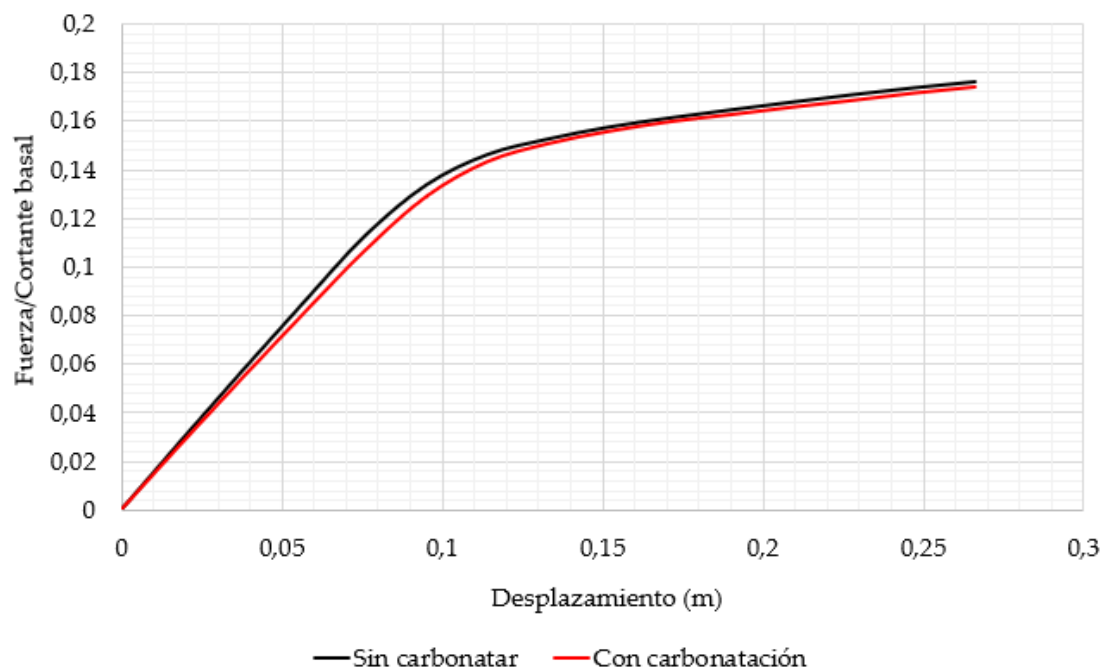
## ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA

### 11.1. CAPACIDAD

En la curva de capacidad es importante hacer análisis basados en capacidad y demanda.

Después de evaluar cada una de las estructuras (Con refuerzo corroido y sin refuerzo corroido) en opensees se obtiene la siguiente gráfica:

Figura 11.1: Resultados Opensees



Fuente: Propia

En esta grafica se evidencia la fuerza horizontal dividida entre el constante basal de la estructura contra el desplazamiento de la estructura bajo condición oxidada y sin oxidación en el refuerzo, se puede observar que la diferencia es mínima, no hay

cambios grandes en los desplazamientos de la estructura.

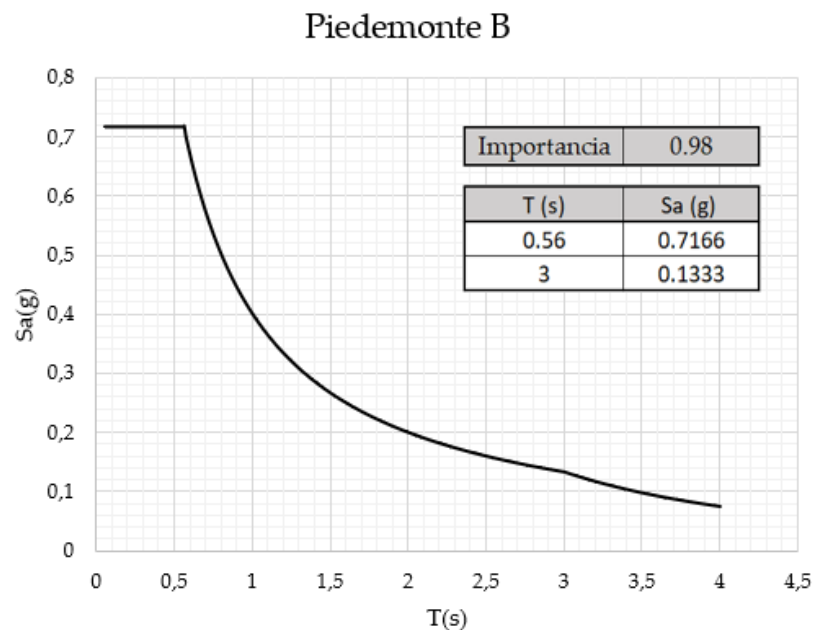
En este procedimiento se usan analisis secuenciales elasticos para la construccion de la curva.

El coeficiente R (medidor de la capacidad de disipación de energía) se calculó a partir de las curvas de capacidad (las 2 son iguales), por ende, no cambia la capacidad de disipación de energía sísmica; no cambia, no porque la estructura esta corroída, sino por la configuración geométrica de las columnas y el refuerzo que tiene.

## 11.2. DEMANDA

La demanda evaluada de desplazamiento evidencia la respuesta recibida de la estructura durante los diferentes movimientos del suelo.

Figura 11.2: Curva de demanda - Piedemonte B



Fuente: Propia

De todas las curvas generadas por cada una de las zonas evaluadas en la ciudad de Bogota D.C. con la debida construcción de los espectros se escoge la de Piedemonte B ya que es la que más se acerca a la del artículo [28].

en la tabla 4.2 están definidas las zonas intervenidas con sus respectivos coeficientes de diseño para la construcción y análisis de las curvas anteriormente mencionadas.

Lo anterior basado en la microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá D.C. y el espectro de respuesta definido en el decreto.



# Capítulo 12

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un aspecto importante por resaltar es el efecto que el cambio climático reflejado en variaciones de temperatura a nivel mundial, se debe tener en cuenta y visto desde el punto de vista químico, la influencia de agentes agresivos que atacan directamente a las estructuras son los cloruros, los cuales son la principal causa de corrosión en el refuerzo de estructuras en concreto. Por lo anterior se concluye que es necesario buscar en lo posible nuevas aleaciones que tengan mayor resistencia a los cambios de temperatura del clima que sirvan como protección a los agentes contaminantes de la estructura, por otro lado se deben intensificar las propuestas de políticas públicas para evitar la propagación de la contaminación en las ciudades.

Los resultados del programa OpenSees en la estructura evaluada bajo índices de carbonatación y sin carbonatación evidencian que el desempeño sísmico es relativamente parecido y no hay diferencias muy altas respecto uno del otro.

Se identifica bajo el nivel moderado de carbonatación con factores ambientales de contaminación normales que no afecta significativamente, esto se puede observar en el análisis de la estructura. Es importante la medición con índices de carbonatación (bajo-medio-alto) para lograr identificar fallas existentes y realizar los diferentes comparativos.

Se recomienda realizar estudios en donde el índice de corrosión sea mayor.

Se recomienda para próximas investigaciones hacer un análisis más de campo basado en las condiciones de contaminación de la zona a evaluar; Así mismo utilizar otros modelos de estructuras con el fin de evidenciar la influencia del refuerzo y las secciones transversales de la estructura en el desempeño de la misma bajo la acción de la oxidación en el refuerzo de la estructura.

Se recomienda seguir el curso de la investigación en diferentes tipos de estructuras bajo los mismos parámetros para evaluar las curvas demanda-capacidad.

Se recomienda realizar pruebas de laboratorio de los aceros involucrados para evaluar y verificar sus propiedades mecánicas.

Se recomienda involucrar costos de los daños evidenciados en el análisis final la estructura.

# Bibliografía

- [1] P. Crespi, M. Zucca, and M. Valente, “On the collapse evaluation of existing RC bridges exposed to corrosion under horizontal loads,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 116, no. June, 2020.
- [2] Z. Shamsoddini Motlagh, M. Raissi Dehkordi, M. Eghbali, and D. Samadian, “Evaluation of seismic resilience index for typical RC school buildings considering carbonate corrosion effects,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 46, no. January, 2020.
- [3] C. V. Inojosa, “Decanos de la UCV alertan sobre “riesgo de colapso” de algunos techos de las facultades,” 2020.
- [4] sonia Iñiguez serrano, “Estacionamientos: riesgo de colapso,” 2019.
- [5] S. Revista, “Estas son las ciudades que tienen mayor riesgo de la peor calidad del aire en Colombia,” 2021.
- [6] Alcaldia Bogota D.C., “Contaminantes Bogota D.C..”
- [7] B. jose Luis, “Corrosion- Estructuras/ Medio ambiente,” 2005.
- [8] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, R. Park, Fellow, and ASCE, “conducted providing the stress-strain relation for the concrete and steel are- known . The moments and curvatures associated with increasing flexural deformations of the column may be computed for various column axial loads by incrementing the curvature a,” *J. Struct. Eng*, vol. 114, no. 8, pp. 1804–1826, 1989.
- [9] R. Leslie, “The Pushover Analysis , explained in its Simplicity,” vol. 0, no. September 2013, pp. 1–13, 2002.
- [10] Alcaldia de Bogota, “Decreto 523 de 2010,” 2010.
- [11] L. Di Sarno and F. Pugliese, “Seismic fragility of existing RC buildings with corroded bars under earthquake sequences,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 134, no. March, 2020.
- [12] M. Kamaya, “Fatigue assessment for seismic loads considering material degradation due to stress corrosion cracking,” *Nuclear Engineering and Design*, vol. 322, pp. 256–265, 2017.

- [13] F. Di Carlo, A. Meda, and Z. Rinaldi, “Numerical evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns,” *Engineering Structures*, vol. 153, no. January, pp. 264–278, 2017.
- [14] Y. C. Ou and N. D. Nguyen, “Influences of location of reinforcement corrosion on seismic performance of corroded reinforced concrete beams,” *Engineering Structures*, vol. 126, pp. 210–223, 2016.
- [15] M. Dogan, “Corrosion failure in concrete reinforcement to damage during seismic,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 56, pp. 275–287, 2015.
- [16] A. Kanchanadevi and K. Ramanjaneyulu, “Effect of corrosion damage on seismic behaviour of existing reinforced concrete beam-column sub-assemblages,” *Engineering Structures*, vol. 174, no. August, pp. 601–617, 2018.
- [17] D. Bru, A. González, F. J. Baeza, and S. Ivorra, “Seismic behavior of 1960’s RC buildings exposed to marine environment,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 90, no. February, pp. 324–340, 2018.
- [18] A. S. Rajput and U. K. Sharma, “Performance of aged reinforced concrete columns under simulated seismic loading,” *Structural Concrete*, vol. 20, no. 3, pp. 1123–1136, 2019.
- [19] E. A. Dizaj, R. Madandoust, and M. M. Kashani, “Probabilistic seismic vulnerability analysis of corroded reinforced concrete frames including spatial variability of pitting corrosion,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 114, no. January, pp. 97–112, 2018.
- [20] Y. Li, S. Yin, M. Liu, and Y. Yang, “Influence of chloride dry-wet cycles on seismic behavior of RC columns strengthened with TRC,” *Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures*, vol. 40, no. 4, pp. 94–103, 2019.
- [21] J. C. Chanchi Golondrino, G. A. MacRae, J. G. Chase, G. W. Rodgers, A. C. N. Scott, and G. C. Clifton, “Steel Building Friction Connection Seismic Performance – Corrosion Effects,” *Structures*, vol. 19, no. November 2018, pp. 96–109, 2019.
- [22] M. Tapan and R. S. Aboutaha, “Effect of steel corrosion and loss of concrete cover on strength of deteriorated RC columns,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 5, pp. 2596–2603, 2011.
- [23] H. Yalciner, S. Sensoy, and O. Eren, “Time-dependent seismic performance assessment of a single-degree-of-freedom frame subject to corrosion,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 19, no. 1, pp. 109–122, 2012.
- [24] D. E. Choe, P. Gardoni, D. Rosowsky, and T. Haukaas, “Probabilistic capacity models and seismic fragility estimates for RC columns subject to corrosion,” *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 93, no. 3, pp. 383–393, 2008.

- [25] Y. Goto and N. Kawanishi, “A unified analysis method to predict long-term mechanical performance of steel structures considering corrosion, repair and earthquake,” *Advances in Steel Structures (ICASS '02)*, vol. II, pp. 1145–1152, 2002.
- [26] R. Yu, L. Chen, D. Zhang, and Z. Wang, “Life cycle embodied energy analysis of RC structures considering chloride-induced corrosion in seismic regions,” *Structures*, vol. 25, no. July 2019, pp. 839–848, 2020.
- [27] X. W. Zheng, H. N. Li, and P. Gardoni, “Life-cycle probabilistic seismic risk assessment of high-rise buildings considering carbonation induced deterioration,” *Engineering Structures*, vol. 231, no. December 2020, 2021.
- [28] L. Berto, S. Caprili, A. Saetta, W. Salvatore, and D. Talledo, “Corrosion effects on the seismic response of existing rc frames designed according to different building codes,” *Engineering Structures*, vol. 216, no. May, 2020.